



# Workshop zur Planung von großen Transportnetzen

Im März 2006 in Bonn  
zu Gast in der Zentrale der Deutschen Post AG

Hrg.: Prof. Dr. Dirk Christian Mattfeld, TU Braunschweig

Am 9. und 10. März 2006 fand die 37. Sitzung der Arbeitsgruppe Logistik und Verkehr auf Einladung von Herrn Dr. Dieter Pütz in der Zentrale der Deutschen Post AG in Bonn statt. Thema der Veranstaltung war die ‚Planung von großen Transportnetzen‘ und die sich hieraus ergebenden Herausforderungen an die Tourenplanung. Insgesamt wurden 19 Fachvorträge über zwei Tage hinweg präsentiert und von den 50 Teilnehmern intensiv diskutiert. Am Abend des ersten Tages gab es die Gelegenheit zum informellen Gedankenaustausch im Brauhaus Bönnsch, das mit hervorragenden Bier die Sitzungsteilnehmer für sich einnehmen konnte.

Die Fachvorträge vermittelten eine aktuelle Übersicht über Modelle, Verfahren und Anwendungen der Standort- und Tourenplanung. Nahezu die Hälfte der Vortragenden kam aus der Praxis, was zu einem anregenden Mix Grundlagen und Anwendungen führte. Das fachkundige Auditorium, das sich aus Vertretern der Hochschulen, Forschungseinrichtungen und der Industrie zusammensetzte, nahm regen Anteil an allen Präsentationen. Besonders fiel auf, dass in der Tourenplanung Forschung und Anwendung zueinander gefunden haben und in weitestgehender Symbiose Entwicklungen vorantreiben.

Die erste Session des ersten Tages war geprägt von „Postgelb“. Nach einem Willkommensgruß des Gastgebers, Herrn Dr. Dieter Pütz präsentierte Herr Dr. Erdmann als Fachvertreter der Deutschen Post AG Herausforderungen an das Operations Research im Brief und Paketdienst. Nachfolgend stellte Herr Prof. Sebastian von der RWTH Aachen seinen Deutsche Post Lehrstuhl zur Optimierung von Distributionsnetzwerken vor. Stellvertretend für viele andere Projekte des Lehrstuhls präsentierte Herr Dr. Irnich ein allgemeines Modellierungs- und Lösungsframework für Vehicle Routing und nachbarschaftsbasierte Metaheuristiken.

Die zweite Session stand unter dem Schlagwort „Dynamik“. Zunächst trug Herr Dr. Schöninger, Universität Bremen zu Dispositionsregeln in einer veränderlichen Umwelt vor. Die Herren Dr. Dorer und Danegger von der Fa. Whitestein Technologies präsentierten einen Agentenansatz für die Tourenplanung und zeigten die Live-Einplanung von eintreffenden Transportaufträgen in einer Softwaredemonstration. Schließlich kam Herr Prof. Kühne vom DLR Berlin in seinem anregenden Vortrag auf die dynamische Erhebung von Reisezeiten auf Basis von Fahrzeugprobanden zu sprechen.

In den vier letzten Vorträgen des ersten Tages sprach Herr Schmidt von der Locom GmbH über ein Postverteilproblem, das mit Evolutionären Algorithmen gelöst wurde. Herr Dr. Gietz von der PROLOGOS GmbH Hamburg referierte über das Spektrum von Problemstellungen in der Distributionsplanung. Frau Rieck, TU Clausthal präsentierte ein Modell und heuristische Lösungsverfahren für die Stückgutkooperation mittelständischer Speditionen und Herr Prof. Graf referierte über die Berücksichtigung von Wechselbrücken in der Tourenplanung.

Den Vortragsteil des zweiten Tages eröffnete Herr Krause von der Universität Köln mit einem Vortrag zu effizienten Organisationsstrukturen für Transportnetze. Herr Prof. Haase, TU Dresden präsentierte ein MIP Modell zur Gestaltung von Transportnetzen für Paketdienstleister und Herr Dr. Grünert, GTS Herzogenrath, präsentierte in 10 Thesen Anforderungen der Praxis an die Theorie, und machte damit bestehende Defizite der bestehenden Forschung zur Tourenplanung offenbar.

In der zweiten Session des zweiten Tages berichtete Herr Dr. Gottlieb, SAP Walldorf, über die breite Anwendbarkeit der SAP Lösung zur Tourenplanung in der Praxis. Herr Dr. Stolle, ILOG Bad Homburg fokussierte auf die Anwendbarkeit von MIP Modellen für die Transportplanung. Schließlich präsentierte Herr Reinholz, Universität Dortmund Forschungsergebnisse aus dem DFG Sonderforschungsbereich ‚Modellierung großer Netze in der Logistik‘. Den Abschluss der AG-Sitzung bestreiteten Herr Heinrichmeyer, Universität Dortmund, Frau Prof. Schöbel, Universität Göttingen, und Dr. Cardeneo, Universität Karlsruhe zu Themen der Transportnetzgestaltung.

Prof. Dr. Dirk Mattfeld



## Programm der 37. Tagung

### "Planung von großen Transportnetzen "

<b>Prof. Dr. Wolfgang Domschke</b> , TU Darmstadt <b>Prof. Dr. Dirk Mattfeld</b> , TU Braunschweig <i>30 Jahre GOR AG Logistik</i>	<b>Seite 1</b>
<b>Dr. Pütz</b> , Deutsche Post AG, Bonn <b>Dr. Jörn Erdmann</b> , Deutsche Post AG, Bonn <i>Steuerung großer Transportnetzwerke mit moderner IT</i>	<b>Seite 10</b>
<b>Prof. Dr. Hans-Jürgen Sebastian</b> , RWTH Aachen <i>Der Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken an der RWTH Aachen</i>	<b>Seite 19</b>
<b>Dr. Stefan Irnich</b> , RWTH Aachen <i>Ein allgemeines Modellierungs- und Lösungsframework für Vehicle Routing und nachbarschaftsbasierte Metaheuristiken</i>	<b>Seite 37</b>
<b>Dr. Jörn Schönberger</b> , Universität Bremen <i>Kurzfristige und mittelfristige Wirkungen der Veränderung von Transportdispositions-Regeln</i>	<b>Seite 70</b>
<b>Dr. Klaus Dorer, Christian Dannegger</b> , Whitestein Technologies GmbH <i>Ein Multi-Agenten-Ansatz zur dynamischen Planung und Steuerung großer Transportnetzwerke in Theorie und Praxis</i>	<b>Seite 78</b>
<b>Prof. Dr. Reinhart Kühne</b> , DLR Berlin <i>Verkehrsaktuelle Flottendisposition mit Fahrzeugprobanden als Reisezeitdetektoren</i>	<b>Seite 92</b>
<b>Christian Schmidt</b> , Locom Consulting GmbH, Karlsruhe <i>Evolutionäre Algorithmen für die Planung der Postzustellung</i>	<b>Seite 101</b>
<b>Dr. Martin Gietz</b> , PROLOGOS GmbH Hamburg <i>Integration der Tourenplanung in die systemgestützte Modellierung und Optimierung großer Transportnetze</i>	<b>Seite 112</b>
<b>Julia Rieck</b> , Technische Universität Clausthal <i>Heuristische Lösungsverfahren für die Tourenplanung mittelständischer Speditionsunternehmen in Stückgutkooperationen</i>	<b>Seite 120</b>

<b>Prof. Dr. Hans-Werner Graf</b> , BiTS, Iserlohn	<b>Seite 133</b>
<i>Optimierung des Wechselbrückentransports - ein Spezialfall der Tourenplanung bei großen Transportnetzen</i>	
<b>Kai Krause</b> , Universität zu Köln	<b>Seite 149</b>
<i>Effiziente Organisationsstrukturen in Transportnetzwerken</i>	
<b>Prof. Dr. Knut Haase</b> , Technische Universität Dresden	<b>Seite 161</b>
<i>Transportnetzgestaltung mit integriertem Flottenmanagement für Paketdienstleister</i>	
<b>Dr. Tore Grünert</b> , GTS Systems and Consulting GmbH, Herzogenrath	<b>Seite 174</b>
<i>Tourenplanung: Herausforderungen für die Theorie aus der Praxis</i>	
<b>Dr. Jens Gottlieb</b> , SAP AG, Walldorf	<b>Seite 189</b>
<i>Tourenplanung in der Praxis</i>	
<b>Dr. Hermann Stolle</b> , ILOG Deutschland GmbH, Bad Homburg	<b>Seite 199</b>
<i>Optimierungslösungen für die Planung von Transportnetzen</i>	
<b>Andreas Reinholz</b> , Universität Dortmund	<b>Seite 210</b>
<i>Herausforderungen bei der Optimierung großer Netze der Logistik: Beispiel Tourenplanung</i>	
<b>Hilmar Heinrichmeyer</b> , IML Fraunhofer Dortmund	<b>Seite 225</b>
<i>Leistungsbewertung verschiedener Optimierungsverfahren für das p-Hub-Problem</i>	
<b>Prof. Dr. Anita Schöbel</b> , Universität Göttingen	<b>Seite 237</b>
<i>Planung von Transportnetzen im öffentlichen Verkehr</i>	
<b>Dr. Steffen Blunck, Dr. Andreas Cardeneo</b> , Universität Karlsruhe	<b>Seite 260</b>
<i>Modellierung und Optimierung von Hub-and-Spoke-Netzen mit beschränkter Sortierkapazität</i>	

# **30 Jahre GOR AG Logistik**

**Prof. Dr. Wolfgang Domschke  
Prof. Dr. Dirk C. Mattfeld**

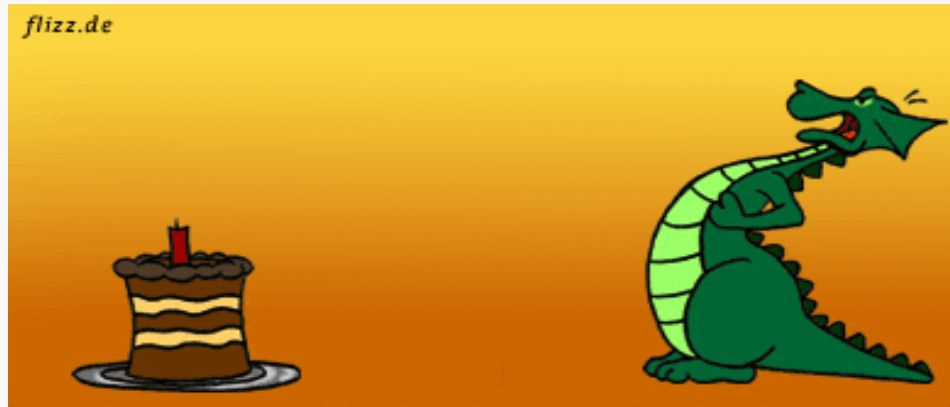
**TU Darmstadt  
TU Braunschweig**



# GOR

## AG Logistik und Verkehr

Herzlichen Glückwunsch zum 30. Geburtstag !!



# GOR

## AG Logistik und Verkehr

1. Treffen: 29.-30. 3. 1976, Univ. Karlsruhe  
20 Vorträge – querbeet  
57 Teilnehmer
2. Treffen: 16. 6. 1976, Battelle-Institut Frankfurt  
Tourenplanung
3. Treffen: 14. 9. 1976, Univ. Erlangen-Nürnberg  
Layoutplanung



# GOR

## AG Logistik und Verkehr

### AG-Leiter:

Prof. Wolfgang Domschke, bis 1980

Prof. Bernhard Fleischmann, bis 1985

Prof. Uwe Pape, bis 1988

Prof. Richard Vahrenkamp, bis 199?

Prof. Klaus Ambrosi, bis 2002

### Prof. Dirk Mattfeld

2003: „**Logistik**“ ergänzt um „**Verkehr**“



# GOR

## AG Logistik und Verkehr

Verkehrsmuseum

Fak. für Verkehrswissensch.  
„Friedrich List“

Knut Haase, Dirk Helbing;  
Andreas Schubert



# Gesellschaft für Operations Research e.V.

## AG Logistik und Verkehr 37. Workshop

Prof. Dr. Dirk Mattfeld  
TU Braunschweig



1

## Was ist Operations Research?

- Unter Operations Research wird allgemein die Entwicklung und der Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung verstanden.
- Operations Research ist geprägt durch die Zusammenarbeit von Mathematik, Wirtschaftswissenschaften und Informatik.

Prof. Dr. Dirk Mattfeld  
TU Braunschweig



2

## Wer ist die GOR?

### Ziel

- Förderung und Verbreitung des Operations Research (Unternehmensforschung) in der Wirtschaft, Verwaltung und Wissenschaft.

### Mitglieder

- Ca. 1.200 Firmen, Institute und Privatpersonen nutzen die Mitgliedschaft zur Aus- und Weiterbildung sowie zum Erfahrungs- und Informationsaustausch.

## Was leistet die GOR?

- Herausgabe der *OR-News* und des *OR-Spectrum*
- Internationale Zusammenarbeit im Rahmen der EURO
- Durchführung einer Jahrestagung
- Organisation von Arbeitsgruppen
- Veranstaltung von Fachtagungen

## Zeitschriften der GOR



- Mitgliederzeitschrift
- Beiträge aus der Praxis
- Termine, Tagungen
- Buchbesprechungen
- International Journal
- A bzw. B Rating
- Sonderhefte
- Beide Zeitschriften frei

Prof. Dr. Dirk Mattfeld  
TU Braunschweig



5



Universität Karlsruhe (TH)  
Research University - founded 1825

## Operations Research 2006 International Conference



**6th - 8th September 2006**



Gesellschaft für Operations Research e.V.



Österreichische Gesellschaft  
für Operations Research



Schweizerische Vereinigung  
für Operations Research



**Business Intelligence, Forecasting and Marketing**

Edel (U St. Gallen), Suhl (U Paderborn)

**Continuous Optimization**

Helmberg (TU Chemnitz), Vial (U Genève)

**Discrete and Combinatorial Optimization**Liebling (ETH Lausanne),  
Zimmermann (TU Braunschweig)**Econometrics, Game Theory and Mathematical Economics**Bamberg (U Augsburg),  
Leopold-Wildburger (U Graz)**Energy and Environment**

Frauendorfer (U St. Gallen), Lüthi (ETH Zürich)

**Finance, Banking and Insurance**

Pflug (U Wien), Schmeiser (U St. Gallen)

**Health and Life Science**

Pickl (UBW München), Rauner (U Wien)

**Logistics and Transport**

Mattfeld (TU Braunschweig), Meyr (WU Wien)

**Managerial Accounting and Auditing**

Küpper (U München), Pfeiffer (U Wien)

**Metaheuristics and Decision Support Systems**

Gutjahr (U Wien), Voß (U Hamburg)

**Multi Criteria Decision Theory**Ehrgott (U Auckland),  
Tammer (U Halle-Wittenberg)**Network Optimization, Graphs and Traffic**

Klinz (TU Graz), Schöbel (U Göttingen)

**Operational and Credit Risk**

Stummer (U Erlangen-Nürnberg)

**Production****and Supply Chain Management**  
Günther (TU Berlin), Hartl (U Wien)**Revenue Management**

Kimms (TU Freiberg)

**Scheduling and Project Management**

Brucker (U Osnabrück), Kolisch (TU München)

**Simulation and Applied Probability**

Bäuerle (U Karlsruhe), Rieder (U Ulm)

**Stochastic Programming**

Huhn (TU Clausthal)

**System Dynamics****and Dynamic Modelling**

Tragler (TU Wien), Zahn (U Stuttgart)

## Operations Research 2006 in Karlsruhe

**Abstract Submission Deadline:**April 30<sup>th</sup>, 2006**Conference's Website:**<http://www.or2006.de>

## Operations Research 2006 in Karlsruhe

## Arbeitsgruppen der GOR

- Entscheidungstheorie und -praxis
- Finanzwirtschaft und Finanzinstitutionen
- Fuzzy Systeme, Neuronale Netze und künstliche Intelligenz
- **Logistik und Verkehr**
- Optimierung von Biosystemen
- OR im Gesundheitswesen
- OR im Umweltschutz
- Praxis der mathematischen Optimierung
- Prognoseverfahren
- Projektmanagement
- Revenue Management und Dynamic Pricing
- Supply Chain Management
- Wirtschaftsinformatik

Prof. Dr. Dirk Mattfeld  
TU Braunschweig



9

## AG Logistik und Verkehr

- Workshops zu Fragestellungen der Logistik und des Verkehrs
- Hoher Praxisbezug der AG-Sitzungen ist angestrebt
- Üblicherweise halbjährliche Ausrichtung der AG-Sitzungen
- Planung der Logistik und Verkehr Sektion bei Jahrestagungen
- Organisation eigenständiger wissenschaftlicher Fachtagungen



Prof. Dr. Dirk Mattfeld  
TU Braunschweig



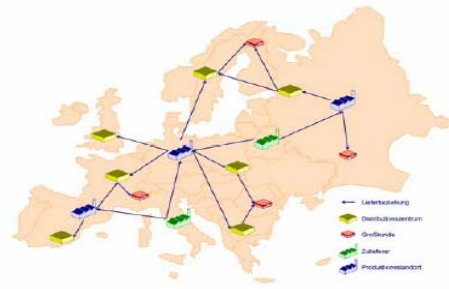
10

## Fachtagung der AG

### Supply Network and Logistics Management

Decision Support,  
Information Systems  
and OR Tools

St. Leon-Rot, 2./3. Feb. 2007



#### Call For Papers

Fachtagung der Gesellschaft für Operations Research (GOR) e.V., veranstaltet durch die Arbeitsgruppen

- Logistik und Verkehr
- Supply Chain Management
- Wirtschaftsinformatik

Im Rahmen der gemeinsamen Tagung der drei Arbeitsgruppen sollen Potenziale und Beispiele zur Nutzung quantitativer Methoden in Supply Chain Management und Logistik präsentiert und diskutiert sowie Synergien zwischen den verschiedenen Bereichen aufgezeigt werden. Die Tagung findet in den Räumlichkeiten der SAP University in St. Leon-Rot statt.

#### Einreichung von Beiträgen

Wir laden interessierte Wissenschaftler und Praktiker herzlich ein, sich mit einem Beitrag zu den genannten Themenbereichen an der Gestaltung dieser Tagung zu beteiligen. Der Umfang der Beiträge sollte 20 Seiten nicht überschreiten.

Kurzbeiträge von Praktikern sind ebenfalls ausdrücklich erwünscht und sollen mindestens drei Seiten umfassen. Bei der Annahme von Kurzbeiträgen behalten sich die Veranstalter eine Veröffentlichung im Tagungsband vor.

Der Tagungsband wird im Physica Verlag erscheinen und soll zur Tagung vorliegen. Für die Erstellung von Beiträgen steht unter <http://www.wininfo.tu-bs.de/SNLM07> eine Vorlage zum Download bereit. Beiträge sollen bis zum 01.06.2006 in elektronischer Form über die Webpage der Tagung eingehen.

Prof. Dr. Dirk Mattfeld  
TU Braunschweig



11

## Infos unter <http://www.gor-online.de>

**GOR e.V. Homepage - Willkommen...** - Microsoft Internet Explorer

Adresse: <https://gor.uni-paderborn.de/>

**GOR** Herzlich willkommen auf der neu gestalteten Internetpräsenz der Gesellschaft für Operations Research (GOR) e.V.

Als Mitglied der GOR e.V. haben Sie nun die Möglichkeit, sich einen eigenen Account anzulegen und somit erweiterte Inhalte zu nutzen.

sie sind hier: startseite

**navigation**

- Startseite
- 1. Die GOR
- 2. Tagungen
- 3. Arbeitsgruppen
- 4. Preise der GOR
- 5. Publikationen
- 6. OR-Links
- 7. Archiv
- 8. Sonstiges

**nachrichten**

- 10. Symposium "Simulation als betriebliche Entsche..." [mehr] 15.02.2006
- Bericht zum GOR Tutorial "System Dynamics" 2004 18.03.2005
- MSSIP 2006 ausgeschrieben 27.12.2004

**Willkommen...**

... auf der Homepage der Gesellschaft für Operations Research (GOR) e.V.

**Operations Research**

Unter Operations Research (OR) wird allgemein die Entwicklung und der Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung verstanden.

Operations Research ist geprägt durch die Zusammenarbeit von Mathematik, Wirtschaftswissenschaften und Informatik.

**Kontaktadresse**

c/o Frau Bärbel Niedzwetzki  
Am Steinknapp 14 b  
D-44795 Bochum

Tel.: +49 (0)2 34 / 46 22 46  
Fax: +49 (0)2 34 / 46 22 45  
[g@gor@ruhr-uni-bochum.de](mailto:g@gor@ruhr-uni-bochum.de)

**Bürozeiten:**  
Dienstag bis Freitag, 10.00 - 13.00 Uhr

**Kontaktadresse Webmaster**

Claus Biederbick  
c/o Decision Support & OR Lab  
Prof. Dr. Leena Suhl  
Universität Paderborn

Tel.: +49 (0)56 93 / 98 92 37  
Fax: +49 (0)56 93 / 98 92 20  
[biederbick@uni-paderborn.de](mailto:biederbick@uni-paderborn.de)

**Marz 2006**

So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

**termine**

- Jahrestagung der Gesellschaft für Klassifikation 2... [mehr]  
Berlin, Germany, 08.03.2006
- Jahrestagung 2006 der Schweizerischen Gesellschaft... [mehr]  
Lugano, Switzerland, 09.03.2006
- GOR-AG "Logistik und Verkehr" Bonn, Germany, 09.03.2006
- Symposium "Simulation als betriebliche Entscheidun..." [mehr]

Prof. Dr. Dirk Mattfeld  
TU Braunschweig



12

# **Steuerung großer Transportnetzwerke mit moderner IT**

**Dr. Pütz  
Dr. Erdmann**

**Deutsche Post AG, Bonn**



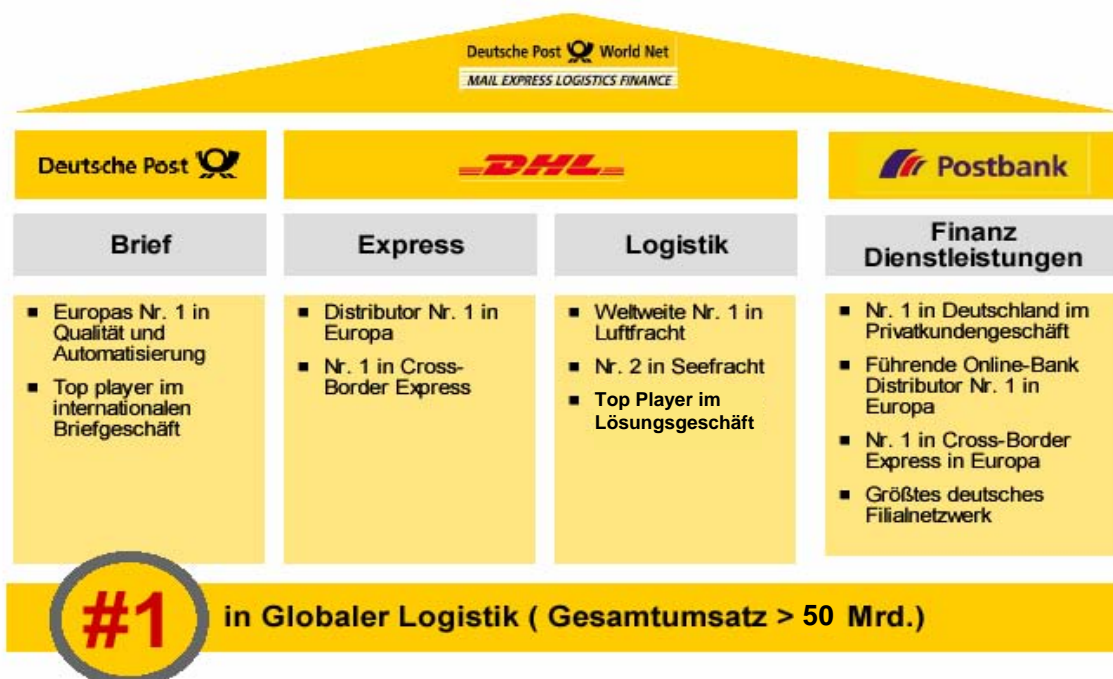
## **Planung von großen Transportnetzen Herausforderung an die Tourenplanung**

### **37. Arbeitsgruppe Logistik und Verkehr**

**Bonn, 9. März 2006**



**Herzlich Willkommen bei der  
Deutschen Post World Net!**







# Steuerung großer Transportnetzwerke mit moderner IT

Jörg Erdmann, Bonn, 09.03.2006



## Grosse Transportnetzwerke



Nach den Übernahmen von DANZAS, DHL und EXEL ist die Deutsche Post World Net mittlerweile der größte Betreiber logistischer Netzwerke weltweit

### Transportnetzwerke der Deutsche Post World Net

#### ■ Luftfracht

- Marktvolumen 23,0 Mrd. EUR [global]
- Marktanteil 11,6 % [2004]
- Weltweite Nr. 1

#### ■ Brief

- Marktvolumen 72 Mio. Briefe pro Werktag [national]
- Marktanteil 96,5 % [2003 - Monopolber.]
- Marktanteil 87,0 % [2003 - Liberalis. Ber.]
- Nationale Nr. 1

#### ■ Seefracht

- Marktvolumen 20,5 Mio. TEU [global]
- Marktanteil 8,7 % [2004]
- Weltweite Nr. 1

#### ■ Kurier/Express/Paket

- Marktvolumen 30,2 Mrd. EUR [D, F, NL, GB, I, E]
- Marktanteil 18,2 % [2003]
- Europäische Nr. 1



## Wesen von Transportnetzwerken



**Transportnetzwerke als Ort der Wertschöpfung unterscheiden sich sehr deutlich von typischen Produktionsbetrieben**

### Eigenschaften von Produktionsbetrieben



- Räumlich konzentriert
- Reproduzierbare, jederzeit gleiche Rahmenbedingungen
- Äußere Einflüsse begrenzt
- Fehler/Abweichungen im Prozess erkennbar
- Gut standardisierbar

### Eigenschaften von Transportnetzwerken



- Verteilte Produktion
- Vielfältige, starke äußere Einflüsse
- Ungeplante Ereignisse jederzeit möglich
- Hohe Freiheitsgrade des Einzelnen
- Prozessstandardisierung schwierig

**Während die Optimierung der Produktion – Stichworte JIT, KANBAN, Kaizen, TQM etc. – schon weit fortgeschritten ist, stehen wir bei den Transportnetzwerken noch am Anfang.**

## Moderne IT



**Ohne moderne IT – im Sinne von kosteneffizient, verlässlich und skalierbar – sind Netzwerke dieser Dimension überhaupt nicht mehr steuerbar**

### STÄRKEN großer Transportnetzwerke

- Weltweite Präsenz
- Abdeckung aller Verkehrsträger / -modi
- Existenz von Economies of Scale

### SCHWÄCHEN großer Transportnetzwerke

- Komplexität
- Fehlende Transparenz
- Tendenz zur Abschottung der Netze untereinander

### Anforderungen an moderne IT

- Leichte Abbildbarkeit von Geschäftsprozessen
- Interaktionsfähigkeit der Systeme
- Robustheit
- Skalierbarkeit
- Hardwareunabhängigkeit
- Non-proprietäre Technologien
- Kosteneffizienter Betrieb
- Weltweite IT-Infrastruktur nach dem „follow-the-sun“-Prinzip

### CHANCEN großer Transportnetzwerke

- Erschließung der Synergiepotentiale
- Flexibilität/Reaktionsfähigkeit
- Angebot von Mehrwertleistungen

### RISIKEN großer Transportnetzwerke

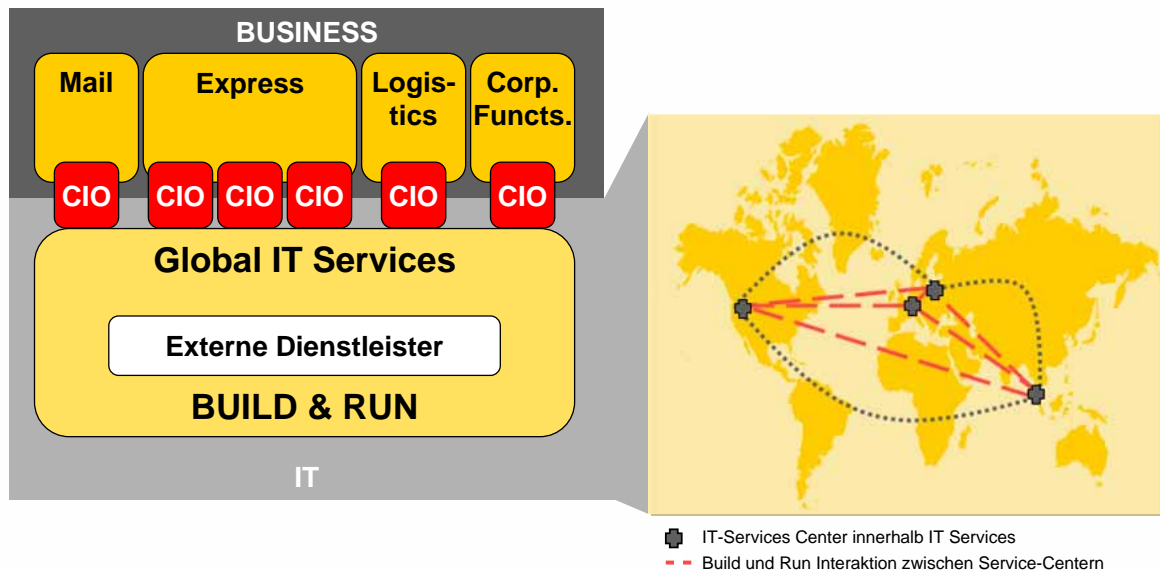
- Verlust der Steuerbarkeit durch Vielfalt voneinander abhängiger Prozesse, Systeme, Daten und Schnittstellen



## IT im Konzern Deutsche Post World Net



Aufgabe der IT im Konzern ist die Übersetzung der Anforderungen des Business in leistungsfähige IT-Systeme



## Barrieren der Potentialerschließung



Bei der Bewältigung der Herausforderungen großer Transportnetzwerke kann Technologie mittlerweile deutlich besser unterstützen

### Situation bis etwa 2000

- Ideen da – das Business hat immer Ideen
- IT nicht in der Lage, diese angemessen umzusetzen
  - Prozessoren langsam
  - Speicherkapazität teuer
  - Netzwerke überlastet
  - Proprietäre Technologien
  - Monolithische Applikationen

IT als „Innovationsbremse“

### Situation nach 2000

- Technologien etabliert
  - Netzwerke, z.B. Internet
  - Identifikation, z.B. RFID
  - Kommunikation, z.B. EDI
  - Lokalisierung, z.B. GPS
  - Offene Standards, z.B. J2EE
  - Objektorientierung / SOA
- Datenbasis vorhanden
  - Data Warehouses
  - Echtzeit-Datenerfassung

IT als „Motor des Fortschritts“

### Schlussfolgerungen

- IT ist nicht länger ein „Show Stopper“
- IT kann dabei helfen,
  - geschäfts- und funktionsbereichsübergreifende Optimierungspotentiale zu heben;
  - Internationalisierung mit sinkenden Durchschnittskosten zu schaffen;
  - Fixkosten zu flexibilisieren, z.B. durch „pay per use“ – Modelle;
  - Zahlen/Daten/Fakten als Grundlage für Entscheidungen des Business bereitzustellen;
  - Technik so zu nutzen, dass das Business die gestellten Anforderungen erfüllen kann.

**Durch moderne IT sind wir zum ersten Mal überhaupt in der Lage, die großen Netzwerke tatsächlich transparent zu machen und steuernd zu beeinflussen.**

## Stufen zur Beherrschbarkeit



Deutsche Post

Die Steuerbarkeit großer Transportnetzwerke wird über mehrere Entwicklungsstufen erreicht

Entwicklungsstufe

Geschäftsnutzen

Beitrag der IT

1. Transparenz

- Fehler erkennen
- Ursachen analysieren
- Verbesserungspotential abschätzen

- Tracking & Tracing bis auf Sendungsebene
- RFID und Scanning
- z.B. TIP, GIS GeoRoute, ...

## Stufen zur Beherrschbarkeit



Deutsche Post

Die Steuerbarkeit großer Transportnetzwerke wird über mehrere Entwicklungsstufen erreicht

Entwicklungsstufe

Geschäftsnutzen

Beitrag der IT

2. Steuerung

1. Transparenz

- Steuerungsmöglichkeiten etablieren
- Handlungsoptionen definieren und bewerten
- **Handeln!**

- Fehler erkennen
- Ursachen analysieren
- Verbesserungspotential abschätzen

- Standort-/Netzoptimierung durch Simulation
- Tourenplanung
- Supply Chain Event Management [SCEM]
- z.B. OPUS, Navigationssysteme in der Zustellung, ...

## Stufen zur Beherrschbarkeit



Deutsche Post

Die Steuerbarkeit großer Transportnetzwerke wird über mehrere Entwicklungsstufen erreicht

### Entwicklungsstufe

### Geschäftsnutzen

### Beitrag der IT

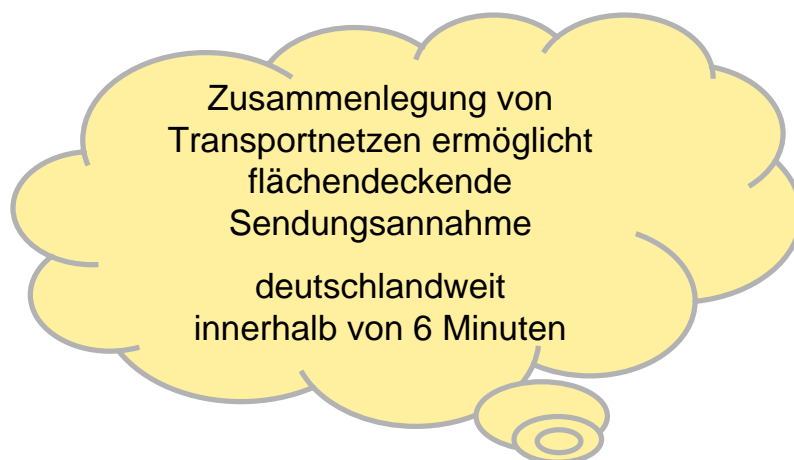


## USP beherrschbarer, großer Transportnetze



Deutsche Post

Wenn große, einzelne Netzwerke auf einer einheitlichen Prozess- und IT-Basis beherrschbar sind ...



... wie würde ein Marketingstrategie daraus einen uneinholbaren USP machen?

## Kontakt



### Dr. Jörg Erdmann

Director Domain Supply Chain  
ITSC Bonn

tel +49 (0)228 182 27560  
fax +49 (0)228 182 27569  
mobil +49 (0)170 571 61 49  
joerg.erdmann@dp-itsolutions.de



Deutsche Post World Net  
IT Services Center Bonn  
Deutsche Post ITSolutions GmbH

Wielandstr. 4  
53173 Bonn - Germany

[www.dp-itsolutions.de](http://www.dp-itsolutions.de)

# **Der Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken**

**Prof. Dr. Hans-Jürgen Sebastian**

**RWTH Aachen**

## **Der Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken an der RWTH Aachen**

**Prof. Dr. Hans-Jürgen Sebastian**

37. Arbeitsgruppensitzung der GOR AG Logistik und Verkehr zum Thema  
Planung von großen Transportnetzen

Deutsche Post World Net, Zentrale Bonn, 9./10. März 2006

### **Agenda**

- Operations Research an der RWTH Aachen
- Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der RWTH Aachen von 1990 bis zur Gründung des Stiftungslehrstuhl im Januar 2004
- Distributionsnetzwerke für den Brief in Deutschland
- Themenfelder für die Forschung
- Projekte des Stiftungslehrstuhls im Überblick und im Detail

## Operations Research an der RWTH Aachen

### Die Idee des OR:

Interdisziplinär zusammengesetzte Teams analysieren Strukturen und Prozesse im Unternehmen (bis in die Details, in die Operations hinein), um Verbesserungspotentiale aufzudecken. Danach werden die neuen, besseren Lösungen mittels quantitativer Methoden bestimmt und im Unternehmen implementiert.

Anwendungsorientierung in diesem Sinne war immer und ist heute der Schwerpunkt für das Operations Research an der RWTH Aachen.

## Operations Research an der RWTH Aachen

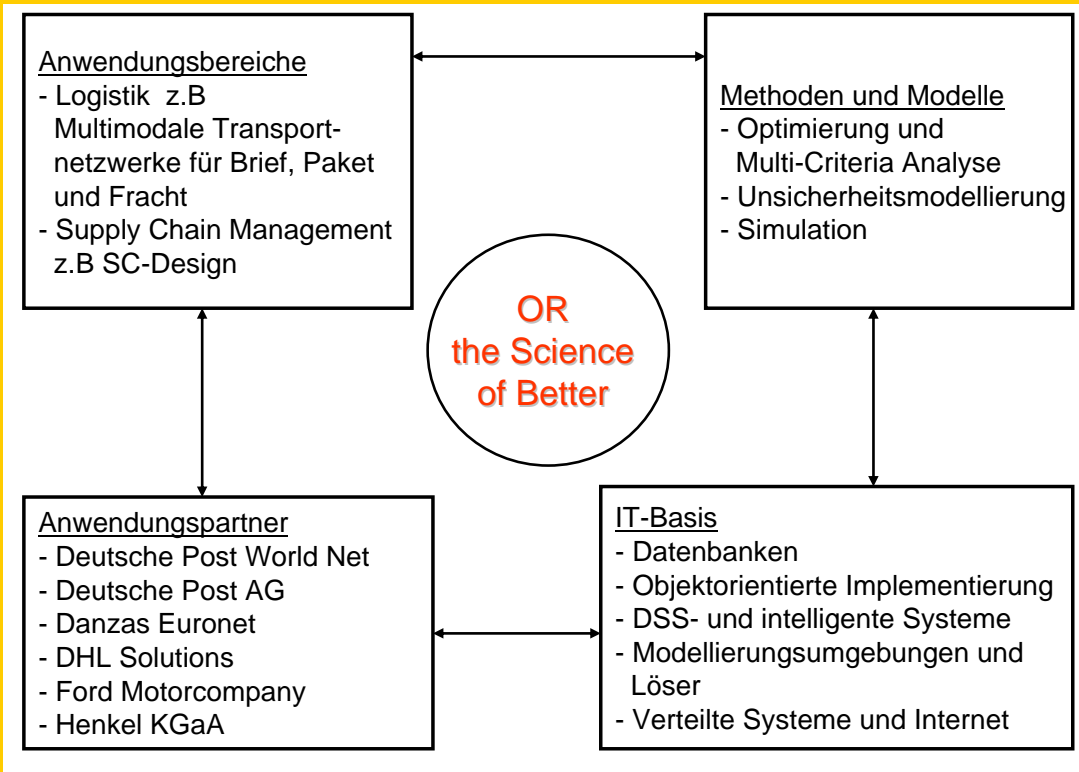
### Die Realität der anwendungsorientierten Forschung zum Operations Research in den vergangenen 20 Jahren:

- Am Anfang fehlten leistungsstarke Methoden!  
Die Entwicklung von Methoden verselbstständigte sich in Richtung einer mathematischen Teildisziplin.
- Daten und deren Vollständigkeit, Widerspruchsfreiheit und Qualität erwiesen sich als Flaschenhals.
- Die Computer Hard- und Software war lange Zeit nicht weit genug entwickelt, um reale Anwendungsprobleme zu lösen.
- Der Wille zur Optimierung in den Unternehmen war nicht stark ausgeprägt.

Heute: Die IT – Barriere ist weitgehend gefallen. Der Druck des Wettbewerbs zwingt die Unternehmen zur Optimierung.

INFORMS: Operations Research – The Science of Better

## Operations Research an der RWTH Aachen



Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

5

## Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der RWTH Aachen von 1990 bis zur Gründung des Stiftungslehrstuhls im Januar 2004

- OR Praktika: Studentische Forschungsprojekte im Sinne der OR-Teams
- Projekte zur Standort-, Netzwerk- und Tourenplanung
- Softwareentwicklung in Kooperation mit der ELITE-Stiftung und der GTS Systems & Consulting GmbH

Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

6



## Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der RWTH Aachen

### OR Praktika der RWTH Aachen mit der DPWN (Auswahl seit 1994)

- Optimierung der Zustellrouten am Beispiel der Stadt Aachen (SS 1994)
- Optimale Eingangssortierung im Postdienst (WS 1994 / 1995)
- Routenoptimierung mit Zeitfenster am Beispiel der Stadt Aachen (SS 1995)
- Optimierung der Standorte der Briefzustellung am Beispiel der Leitregion 94 (SS 1995)
- Implementierung zur Fallstudie: Verkehrsmengenprognose für den Briefeingang der Deutschen Post AG, Niederlassung Aachen (WS 1995 / 96)
- Standortoptimierung in der Briefzustellung für die Deutsche Post AG (WS 1995 / 1996)
- Standortplanung der Ablagestellen für die Briefzustellung der Deutschen Post AG (SS 1996)
- Einsatzplanung für Springer in der Briefzustellung der Deutschen Post AG (SS 1996)

## Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der RWTH Aachen

- Optimaler Produktionsverbund zwischen überlagerten Zustellnetzen für die Deutsche Post AG (WS 1996/1997)
- Produktivitätskennzahl in der Briefzustellung (SS 1997)
- Transportplanung innerhalb von Terminalsystemen (WS 1999/2000)
- Untersuchung der Standortfestlegung für Zustellstützpunkte in der Stadt Aachen (SS 2000)
- Postleitzahlssysteme und automatisierte Briefbearbeitung (SS 2001)
- Organisatorische Glättung von Belastungsschwankungen in der Briefzustellung (SS 2002)
- Kategorisierung der Nutzerprofile für das Transportportal Portivas (WS 2002/2003)
- Analyse der Regionalverkehrsnetze Brief und Express der Region Bielefeld für Deutsche Post World Net (SS 2003)
- Netzoptimierung Verbundzustellung für Deutsche Post AG (SS 2003)
- Analyse der Regionalverkehrsnetze Brief und Expresß in der Region Bielefeld (SS 2003)

## Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der RWTH Aachen

- Optimale Versorgung von ausgelagerten Zustellbezirken für die Deutsche Post World Net (WS 2003/04)
- Analyse der Standortstruktur in der Briefzustellung der Deutschen Post (SS 2004)
- Analyse unterschiedlicher Zustellbezirksstrukturen in der Briefzustellung – Deutsche Post AG (WS 2004/05)
- Berechnung der optimalen Anzahl an Distributionszentren unter Berücksichtigung bestimmter Service Level in Zusammenarbeit mit DHL Solutions (WS 2004/2005)
- Standortplanung unter Berücksichtigung von Lagerbeständen in Zusammenarbeit mit DHL Solutions (SS 2005)
- Vergleichende Untersuchung von Transportkostenmodellen für die Versorgungsfahrten von Zustellstützpunkten der Deutschen Post (SS 2005)
- Netzwerkdesign unter Berücksichtigung der Kostenstruktur in Zusammenarbeit mit DHL Solutions (WS 2005/2006)
- Optimale Bestimmung der Lage von Vorbereitungszentren für die Briefzustellung der Deutschen Post (WS 2005/2006)

## Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der RWTH Aachen

### Projekte und Softwareentwicklung

#### *A. ISB-/FT: Informations- und Planungssystem Brief- / Frachttransport: (seit 1995)*

- Tourenplanung für Einsammeln und Distribution von Briefen / Paketen
- Hauptlaufnetzwerk
  - Optimierung des Nachtluftpostnetzwerkes und der Feeder Netzwerke
  - Optimierung der Hubstruktur und Leitwege

#### *B. Standortoptimierung der Zustellstützpunkte (ZSP) (seit 1996)* Auswahl der ZSP-Standorte aus einer Kandidatenmenge und Zuordnung der Zustellbezirke zu den Zustellstützpunkten.

#### *C. POP II: Tourenplanung im Ladungsverkehr der Danzas Euronet GmbH (seit 1996)* Planungssystem für kostenoptimale, multi-modale Wechselbrücken Transporte einschließlich Repositionierung (2001 und 2002 an der RWTH)

## Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der RWTH Aachen

### Optimierung des Nachtluftpostnetzwerkes

- **Netzwerk-Design-Problem**
- **Servicequalität „E+1“** erfordert Transport eines Teils der Briefmengen per Flugzeug
- taktische Planung eines **Regelnetzes**

### Was ist zu entscheiden?

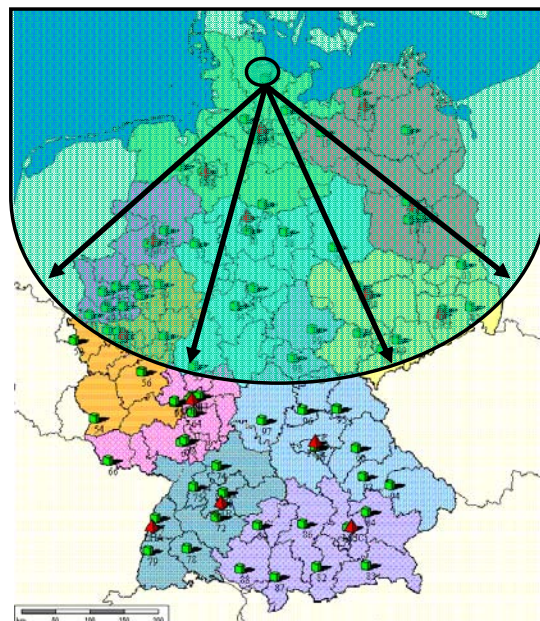
- Auswahl der NLP-Relationen
- Netztopologie
- Zuordnung von Relationen zu Start- und Zielflughäfen
- Flugrelationen und Flugzeugtypen
- zeitliche Abfolge (Schedule)
- Zuordnung von NLP-Relationen zu Flügen

Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für  
Optimierung von Distributionsnetzwerken

11

### Auswahl der NLP-Relationen

- 82 BZA und BZE
  - Relationen insgesamt:  
 $81 \cdot 82 = 6642$
- Zeitfenster von ca. 7 Stunden zwischen
  - Sortierschluß BZA
  - letzte Sortierung BZE
- GIS liefert Basisdaten zur Erreichbarkeit der BZE über Straßen von einem BZA aus



Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für  
Optimierung von Distributionsnetzwerken

12

## Netztopologie

### ■ Direktflüge

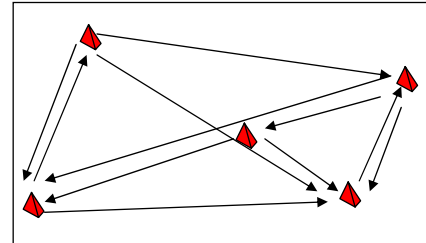
-für stark auszulastende Flugrelationen

### ■ Hubflüge

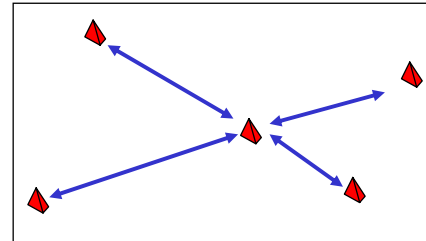
-Konsolidierung schwächerer Flugrelationen durch Hub-Umschlag

-zentraler Flughub in Frankfurt a.M. wird bereits seit 1961 genutzt

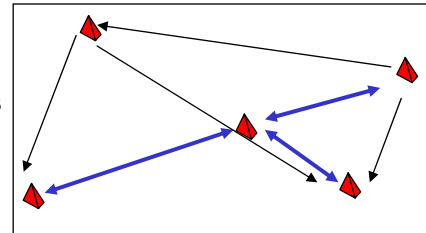
1. Direktfluggesetz



2. Hubfluggesetz



3. gemischtes Netz



Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

13

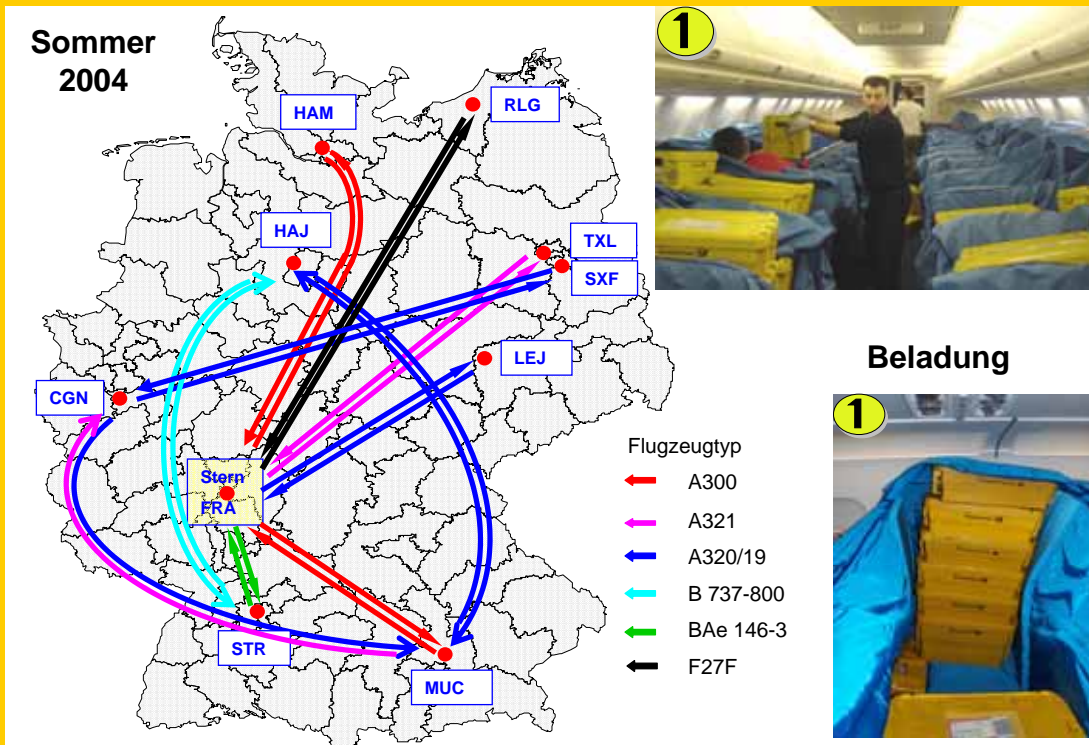
5 Fluggesellschaften, 10 Flughäfen, 13 Flugzeuge pro Tag, 20 Strecken



Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

14



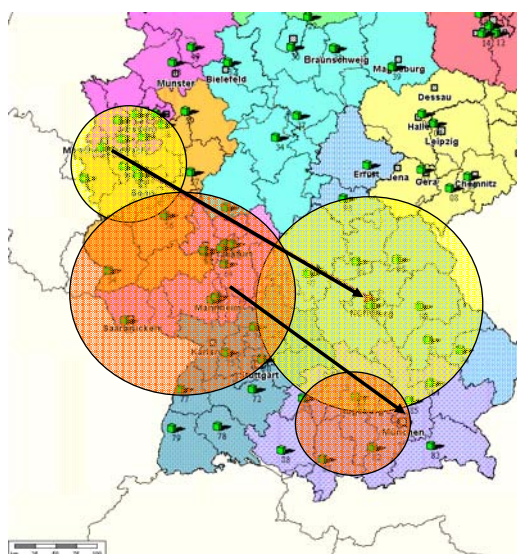


Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für  
Optimierung von Distributionsnetzwerken

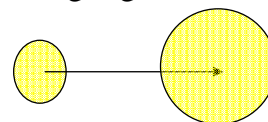
15

## Zeitliche Abfolge (Schedule)

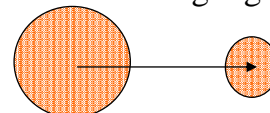
- Abhängigkeit der zuordenbaren Relationen von Abflug- und Ankunftszeit



– frühe Abflugzeit  
ergibt:  
kleiner Einzugsbereich, großer  
Versorgungsbereich



– späte Abflugzeit  
ergibt:  
großer Einzugsbereich,  
kleiner Versorgungsbereich



Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für  
Optimierung von Distributionsnetzwerken

16

## Flugrelationen und Flugzeugtypen

- Zwischen welchen Flughäfen sollen **Direktflüge** stattfinden?
- Zwischen welchen Flughäfen sollen **Hubflüge** stattfinden?
- **Flugzeugtyp** bestimmt

- verfügbare Kapazität
- Flugzeit (Jet vs. Turboprop)
- Be- und Entladezeit
- Kosten

**Airbus**  
A 320



**Airbus**  
A 300



**Fokker**  
F27F



- **Ausgeglichene Bilanzen von ankommenden und abgehenden Flugzeugen**

eines Flugzeugtyps an jedem Flughafen erwünscht

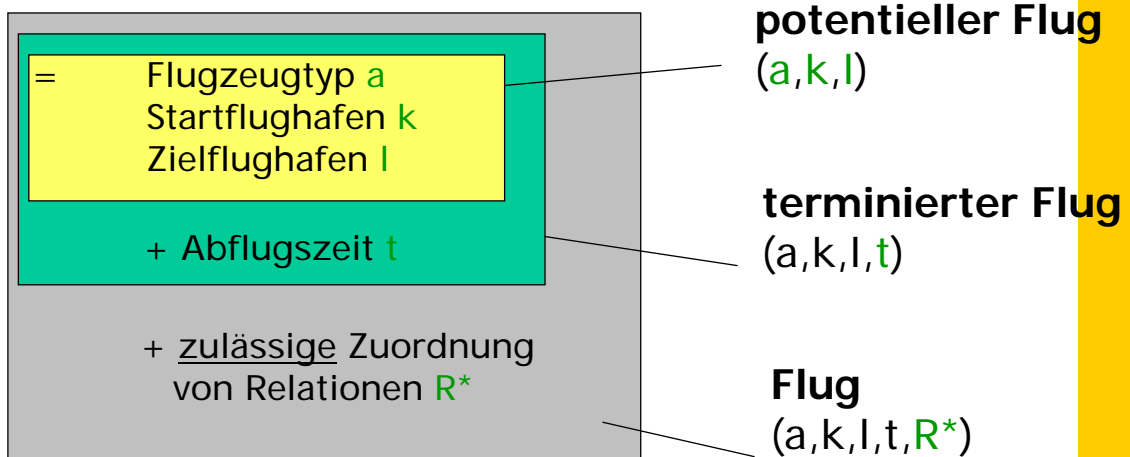
- Ferry-Kosten (Kosten für Rückführung eines Flugzeuges nach einem Einwegflug)

Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für  
Optimierung von Distributionsnetzwerken

17

## Zuordnung von NLP-Relationen zu Flügen

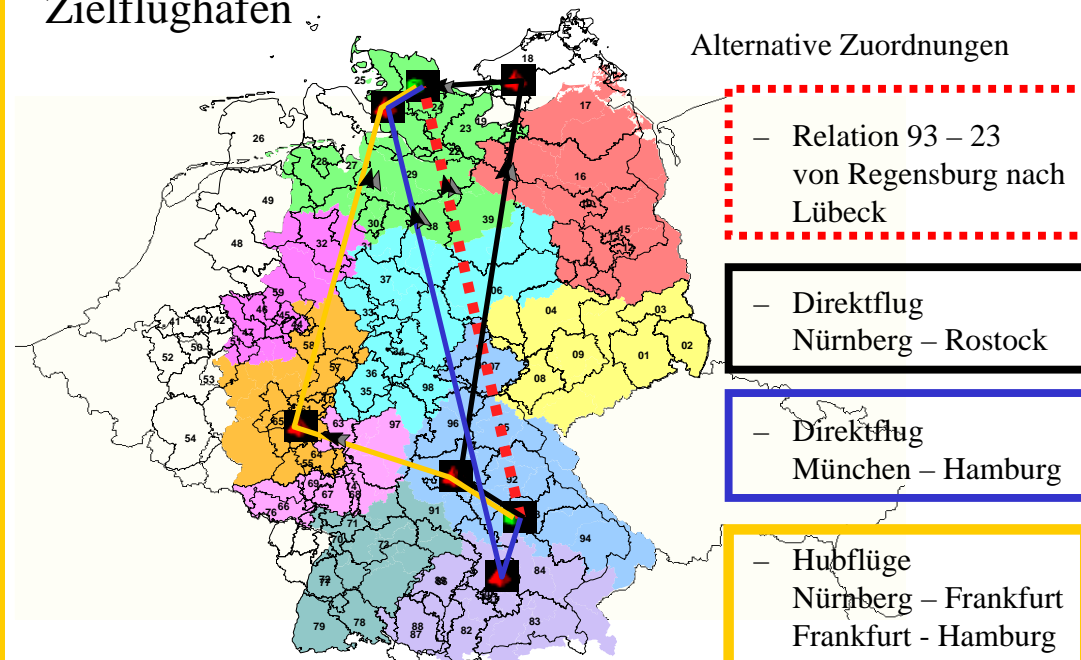
### Was definiert überhaupt einen Flug?



Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für  
Optimierung von Distributionsnetzwerken

18

## Beispiel: Zuordnung von Relationen zu Start- und Zielflughäfen



Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für  
Optimierung von Distributionsnetzwerken

20

## Entscheidungsunterstützung durch ...

- **Analyse- und Auswahlwerkzeuge zur Auswahl der NLP-Relationen**
  - Analyse von Mengen, Zeitfenstern, Sortierkapazitäten
  - regelbasierte Auswahl
- **Simultanmodell für Planung des Flugnetz-Netz-Designs**
  - Direkt- und Hubflüge mit Zuordnung aller NLP-Relationen
  - basierend auf gemischt-ganzzahligem LP-Modell
- **Nachgelagerte Tourenplanung**
  - zur Planung der Verkehre zwischen BZ und Flughafen
  - spezielle Variante des Pickup-and-Delivery, heterogene Fahrzeugflotte

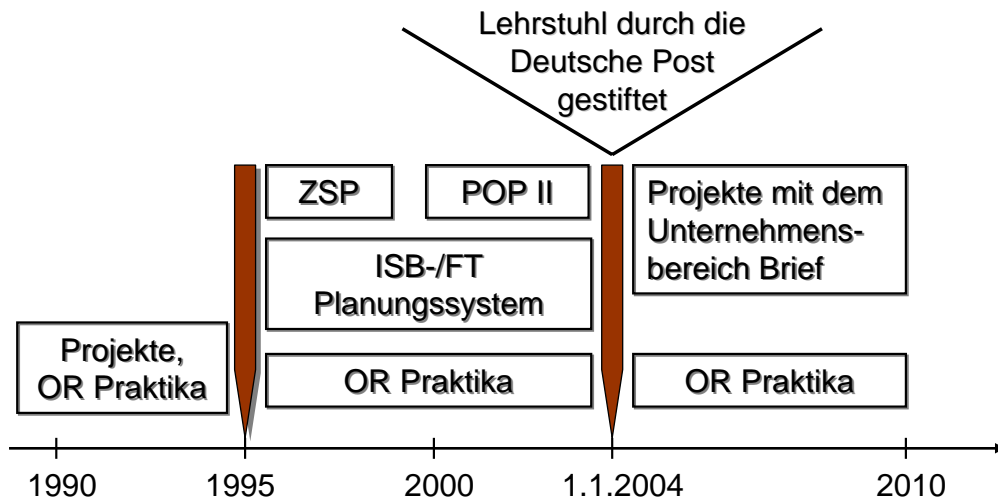
Chr. Stiefelhagen in Zusammenarbeit mit Deutsche Post Lehrstuhl für  
Optimierung von Distributionsnetzwerken

19

## Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der RWTH Aachen

### Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

Ergebnis langjähriger Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post World Net und der RWTH Aachen auf dem Gebiet des Operations Research



Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

21

## Distributionsnetzwerke für den Brief in Deutschland

### Forschungsfeld des Deutschen Post Lehrstuhls

Das Transportnetzwerk Brief der Deutschen Post AG ist ein komplexes Logistiksystem, mit:

39,7 Millionen Abgabestellen (davon werden zwei Drittel an jedem Werktag bedient)

3 Millionen Geschäftskunden

72 Millionen Sendungen werden täglich bearbeitet

108 000 Briefkästen

82 Briefzentren (BZ) + Internationales Postzentrum in Frankfurt

3 300 Zustellstützpunkte (ZSP) und mehr als 12 000 Filialen



Letzte Meile

ca. 61 200 Zustellbezirke zu Fuß ca. 10 500

per Fahrrad ca. 25 500

mit dem Auto ca. 25 000

ca. 81 000 Zusteller

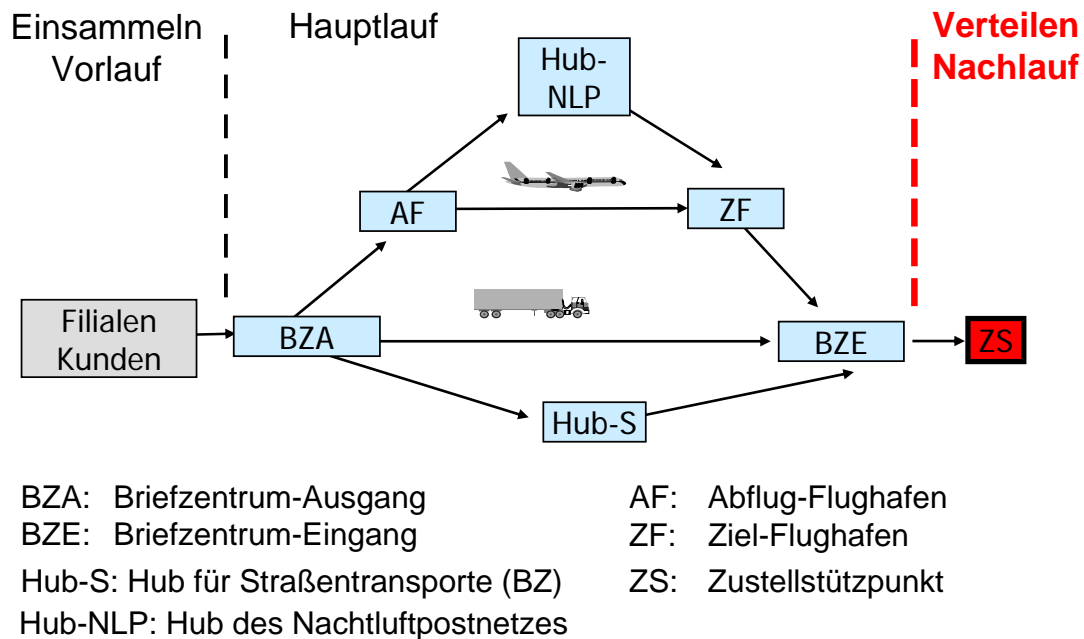
Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

22



## Distributionsnetzwerke für den Brief in Deutschland

**Beispiel:** Schematische Darstellung des Netzwerkes für den Transport und die Zustellung von Briefen der Deutschen Post

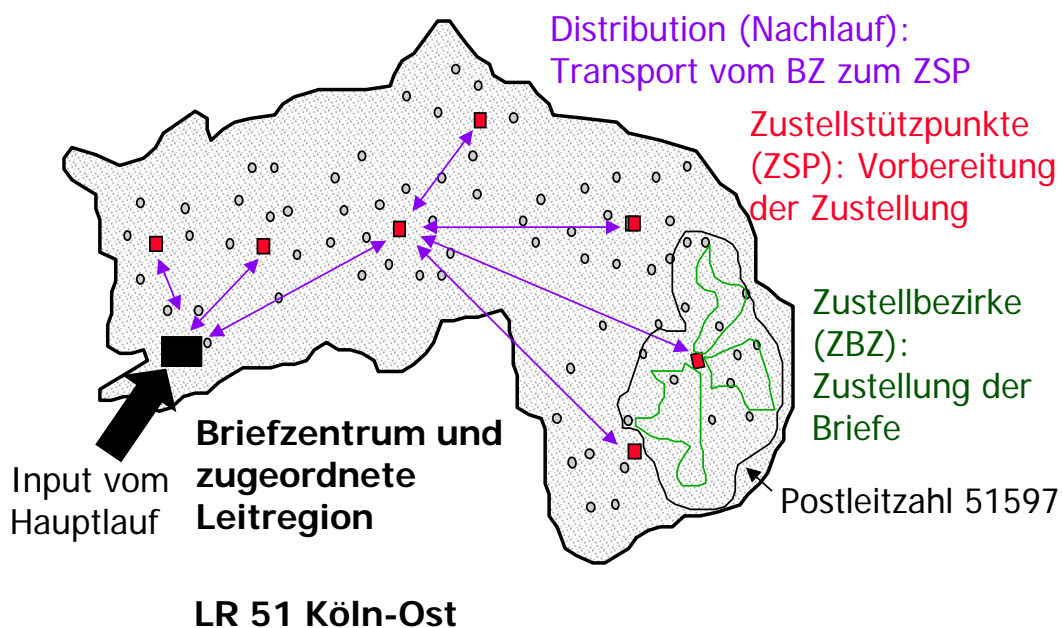


Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

23

## Distributionsnetzwerke für den Brief in Deutschland

## Nachlauf und Zustellung von Briefen



Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

24

## Distributionsnetzwerke für den Brief in Deutschland

### Optimierung des Distributionsnetzwerkes bedeutet

- Modellierung des physischen Netzwerkes und Lösung der Planungsaufgaben:  
Güter (hier Briefe) unter Einhaltung von Qualitätsanforderungen (E+1) bei minimalen Kosten von Ursprungs- zu Bestimmungsorten zu bringen.

### Dekomposition in Planungsphasen (aus Komplexitätsgründen):

#### Strategische Phase

Überlappungen

- Anzahl und Beschaffung der wesentlichen Ressourcen  
Standorte, Facilities, Flotten, Personal
- Auswahl der Services

#### Taktische Phase (Service Netzwerk Design)

Strategisch/Taktische Phase

- Transporte und deren zeitliche Planung
- Strategien für den Betrieb der Facilities
- Repositionierung von Fahrzeugen, Transportbehältern

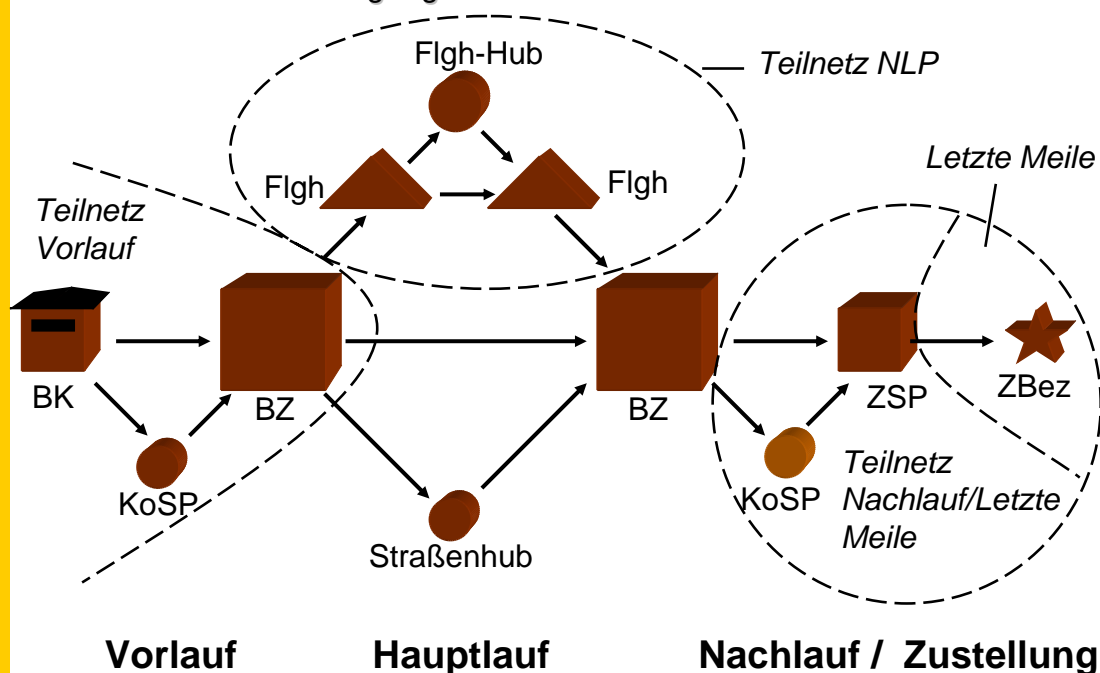
#### Operationelle Phase

Taktisch/Operationelle Phase

- On-line Optimierung in Echtzeit, Fahrzeug Disposition etc.

## Themenfelder für die Forschung

Dekomposition des komplexen Netzwerkes in Teilnetzwerke  
 Weitere Schematisierung ergibt:



## Themenfelder für die Forschung ausgehend vom Distributionsnetzwerk für Brief

Netzwerk	Planungsphasen		
	Strategische Planung	Taktische Planung	Operationelle Planung
<u>Gesamtnetzwerk</u>	Facility Location/Allocation Location Routing	Transportnetzwerk Design Vehicle Routing	Operations Center
<u>Teilnetzwerke:</u>	Dekomposition/Integration von Netzen u. Services (exakt bzw. heurist.)		
- Vorlauf	Location / Allocation	Multi-Depot Vehicle Routing	On-line Optimierung für Transport-Teilnetzwerke
- Hauptlauf	Location/Allocation (Hub-Selection) (Airport-Selection)	Service Netzwerk Design Multi-Depot Vehicle Routing und Scheduling	
• Hubs u. Leitwege			
• Direktfahrten			
• NLP			
• Flughafenfeeder			
- Nachlauf	Location/Allocation (ZSP) Location Routing	Vehicle Routing/ Scheduling	
- Letzte Meile	Capacitated Arc Routing, Briefträgerprobleme		
<b>Briefzentren</b>	<b>Simulation von Layouts</b>		

### Projekte des Stiftungslehrstuhls

#### Aktuelle Projekte am Stiftungslehrstuhl:

- 1. Vorlauf / Hauptlauf : BZA-Optimierung**  
 Optimale Zuordnung der Briefquellen zu BZA. Schnittstelle Transport / Stationäre Bearbeitung wird modelliert.
- 2. Nachlauf / Letzte Meile : ZSP Standortoptimierung**  
 Neuauflage des erfolgreichen Projektes von 1996
- 3. Nachlauf / Letzte Meile : ZSP Optimierung**  
 ZSP Standort und Postleitzahlflächen bekannt  
 → Schneidung in Zustellbezirke (ZBez), Wahl der Zustellart, Wahl der Gangfolge  
 CARP, Postman Probleme (generisch)
- 4. Gesamtnetzwerk : Schnellläufernetz**  
 Strategische Standortplanung, Distribution von Zeitungen und Zeitschriften
- 5. Briefzentren : Transportbehälter-Simulation**  
 Layoutplanung großer BZ durch Simulation des Behältertransports

## Projekte des Stiftungslehrstuhls

### ZSP Standortoptimierung

- 1995 – 1997: erstmals bundesweite Standortoptimierung durchgeführt:
  - Reduktion von ca. 6.400 auf ca. 3.400 ZSP
  - Resultat: 20% Einsparungen!
- 1995 – 2006: Planung von Standorten
  - manuelle Planung und Unterstützung durch die
  - Excel-basierte Standortsoftware STATOP
- ab 2006:
  - Entwicklung eines neuen IT-Werkzeuges für die Standortplanung unter Berücksichtigung
    - der Veränderungen in dem Distributionsnetzwerk seit 1995 und
    - zukünftiger neuer Konzepte.

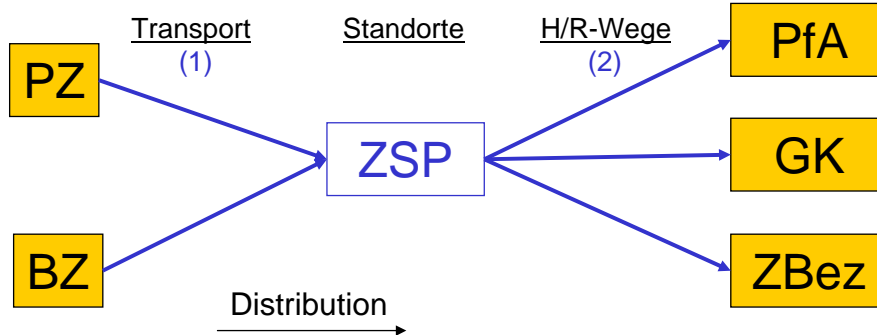
## Projekte des Stiftungslehrstuhls

### Wie wurde bisher geplant?

- Das Produkt „Paket“ wurde bisher nicht betrachtet
  - macht aber mind. ca. 10-15% des Netzes aus!
- Transportkosten durch Pendeltouren
  - Anzahl Pendeltouren zu einem ZSP, werden vom Planer manuell eingegeben
- Einheitliche Standortkosten für gesamten Planungsbereich pro qm und Monat verwendet
  - Aber: Teils sehr starke regionale Unterschiede
- H/R-Wege des Zustellers durch Pendeltouren
  - Km-abhängige Staffelung der Kosten durch heterogenen „Fuhrpark“: Fuß, Fahrrad, Auto, Pkw, ÖPNV

## Projekte des Stiftungslehrstuhls

## Aufgabenstellung

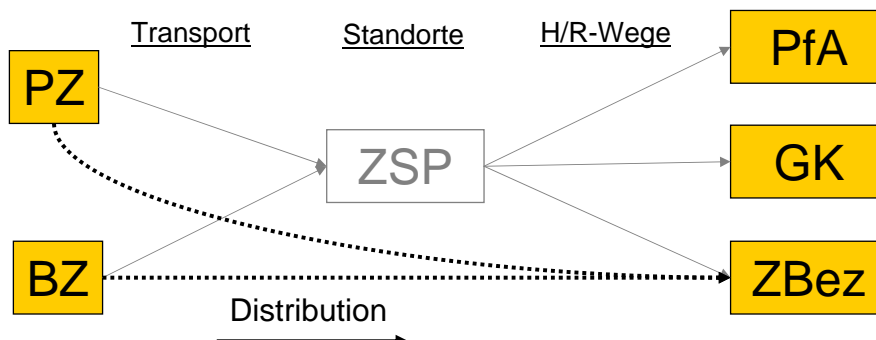


Es ist zu entscheiden über ...

- ... die Position und Anzahl und Größe der **ZSP**
- ... die Zuordnung (1) von **ZSP** zu BZ/PZ (*multiple-allocation*)
- ... die Zuordnung (2) von Kunde zu **ZSP** (*single-allocation*)
- Ziel ist die Minimierung der gesamten Distributionskosten.

## Projekte des Stiftungslehrstuhls

## Aufgabenstellung



Fest vorgegeben ...

- ... Positionen der BZ/PZ und der Kunden
- ... jeder Kunde ist genau einem BZ und einem PZ zugeordnet
- ... die Menge der potenziellen Standorte

## Projekte des Stiftungslehrstuhls

### Dimension der Problem instanzen

- Zweistufiges Standortproblem mit folgenden Dimensionen:
  - 2 – 5 Distributionszentren (BZ/PZ)
  - ca. 100 Standorte (ZSP)
  - ca. 500 Kunden (PLZ-Bezirke, PfA, GK)
  - ca. 1200 – 1500 potenzielle Standort, falls man die ZBez als potenzielle Standorte wählt
  - 2 Produkte, heterogene Fuhrparks auf beiden Stufen
- rein binäres lineares Problem:
  - In der Literatur bisher kaum untersucht
    - wesentlich kleinere Instanzen (max. 10/50/500)
  - Schnell bis zu 150.000 EV und 300.000 NB:
    - Entscheidend ist die Auswahl der potenziellen Standorte

**Ein allgemeines Modellierungs- und  
Lösungsframework für  
Vehicle Routing und  
nachbarschaftsbasierte Metaheuristiken**

**Dr. Stefan Irnich**

**RWTH Aachen**



# Ein allgemeines Modellierungs- und Lösungsframework für Vehicle Routing und nachbarschaftsbasierte Metaheuristiken

Deutsche Post Lehrstuhl  
für Optimierung von  
Distributionsnetzwerken

RWTH Aachen

Stefan Irnich

AG Logistik und Verkehr  
Arbeitsgruppensitzung

Bonn

8. März 2006

## Worum geht es in diesem Vortrag?

### Beitrag:

- Generisches **Modellierungs- und Lösungs-Framework** für VRP mit komplexen Nebenbedingungen ("**rich VRP**")
- **Beschleunigung Lokaler Suchverfahren**
  - Knoten- und Kantentauschverfahren
  - "reine" Lokale Suche (LS)
  - in Metaheuristiken
    - basierend auf LS: TS, VND, VNS, GRASP, etc.
    - hybride Metaheuristiken: hybrid GA, SA, LSMC

## Worum geht es in diesem Vortrag?

### Ergebnisse:

- Durchsuchen von  $O(n^k)$  Nachbarschaften
  - in  $O(n^k)$  Zeit (worst case!)
  - mit  $O(n^{4/3})$  Speicher
  - Handling komplexer, praxisrelevanter Nebenbedingungen
  - kein zusätzlicher Aufwand für Zulässigkeitstests
- Beschleunigung des Average Case
  - Abschneiden des Suchbaums
  - **Sequential Search** (Ir., Funke, Grünert 2004)
- Ergebnisse für CVRP, VRPTW, VRPSDPTW, MDVRP, PVRP, PDP und andere.

## Agenda

1. Einführung
  1. Tourenplanung
  2. Trends
2. Vereinheitlichtes Modellierungs- und Lösungsframework für "Rich" VRP
3. Rechenergebnisse
4. Zusammenfassung

## 1.1 Tourenplanung

---

Eine mögliche Definition:

Unter Touren- und Routenplanung versteht man die Planung des **Einsatzes** einer **Fahrzeugflotte** zur **Bedienung** einer Menge von **Aufträgen** über einen gegebenen **Planungshorizont**.

## 1.1 Tourenplanung CVRP – Grundproblem der Tourenplanung

---

Gleichartige Fahrzeuge

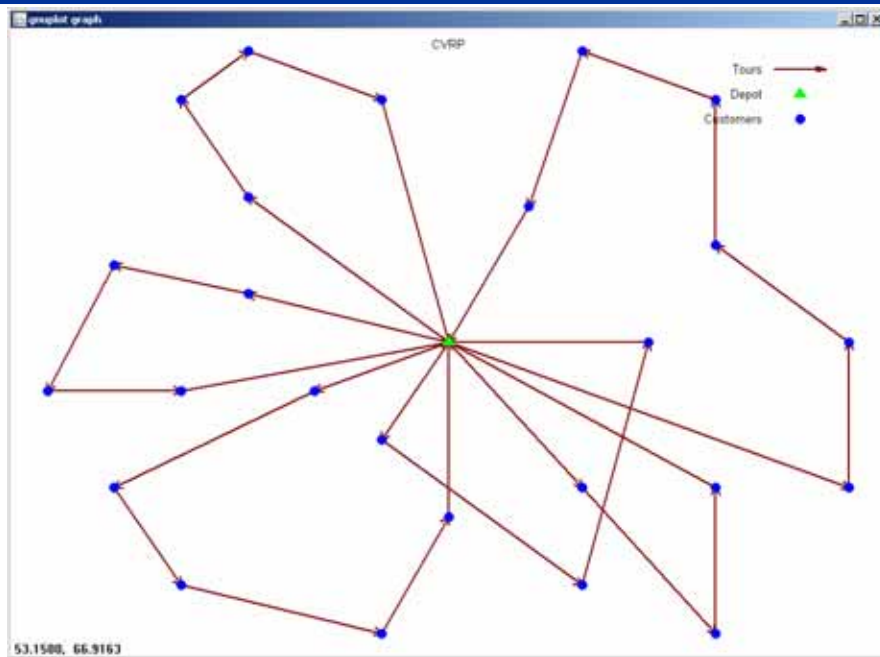
- begrenzter Kapazität
- stationiert an einem Depot
- müssen eine Menge von Kunden mit gegebenen Bedarfen bedienen.

Zwei interdependente Teilaufgaben sind:

- **Clusterung**: Zuordnung der Kunden zu Touren
- **Routing**: Bestimmung der Reihenfolge der Kunden in den Touren

Ziel ist die Minimierung der Gesamtkosten  
(Anzahl Touren, Gesamtdistanz)

## 1.1 Tourenplanung CVRP – Grundproblem der Tourenplanung



Stefan Irnich

-7-

## 1.2 Trends Anforderungen

### Komplexere Problemstellungen - „Rich“ VRP

#### ● **Auftragsstruktur**

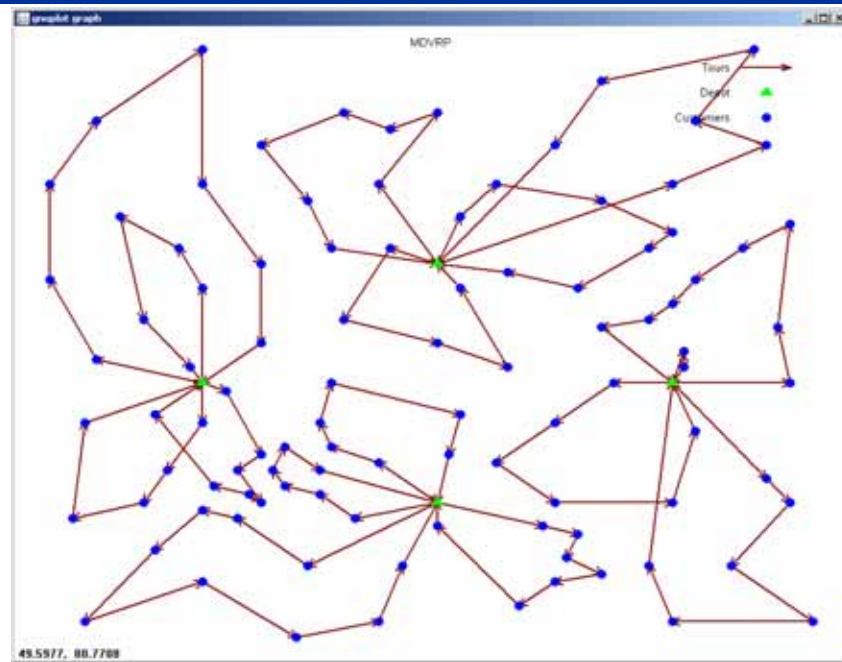
- kombiniertes Anliefern und Abholen (Backhauling, VRPSDP, P&D, allg. Präzedenzen)
- (mehrfache) Zeitfenster
- (In)Kompatibilitäten (Auftrag-Auftrag, Auftrag-Fahrzeug)
- Periodische Problemstellungen (sog. Besuchsmuster, bspw. Mo/Mi/Fr oder Di/Do/Sa)
- ...

#### ● Mehrere **Depots** oder offene Touren

Stefan Irnich

-8-

## Beispiel für ein Multi-Depot VRP



Stefan Irnich

-9-

## 1.2 Trends Anforderungen

### Komplexere Problemstellungen - „Rich“ VRP

- **Heterogener Fuhrpark**
  - Kapazitäten, Kosten, (In)Kompatibilitäten, etc.
- **viele weitere Typen von Nebenbedingungen**
  - beschränkte Arbeitszeit, Wartezeit, ...
- **Zielfunktionen**
  - Mix aus Fixkosten, Weg- und Zeit-abhängigen Kosten
  - Nutzung realer Transporttarife (LTL: Distanz, Menge)
  - Balance der Arbeitslast zwischen Touren

Stefan Irnich

-10-

## 1.2 Trends

### Anforderungen und wissenschaftl. Behandlung

---

#### Schnellere Lösungsverfahren und größere Problem instanzen lösen

- In der Praxis:
  - einige Hundert bis Tausend Transportaufträge pro Tag
  - Disposition „von Hand“,  
Softwaresysteme arbeiten im Batch,  
selten als interaktive Informations- und Planungssysteme
- Grundproblem CVRP
  - exakt: bis ca. 120 Kunden
  - heuristisch: i.d.R. <500 Kunden
- Erweiterungen
  - exakt: z.B. VRPTW konsistent bis ca. 50 Kunden
  - heuristisch: i.d.R. <200 Kunden

## 1.2 Trends

### wissenschaftliche Behandlung

---

#### Schnellere Lösungsverfahren und größere Problem instanzen lösen

- Gehring & Homberger (1999)
  - VRPTW bis 1000 Kunden
- Toth & Vigo (2003): „Granular Tabu Search“
  - CVRP bis 500 Kunden
- Irnich et al. (2004): „Sequential Search“
  - CVRP bis 2500 Kunden
- Kytöjoki & Bräysy (2005)
  - VRPTW mit 1000 – 20 000 Kunden

## 1.2 Trends

### Weitere Anforderungen

---

- **Präzisere und robustere Heuristiken**
  - für Standardprobleme ca. 1 bis 2% max. Fehler
- **Einfachere Heuristiken**
  - Gendreau et al. (2002):  
„It is time to develop simpler methods capable of quickly providing good quality solutions.“
  - einfache Beschreibung und Implementierung
  - weniger (zu kalibrierende) Parameter
  - einfach an reale Problemstellung anzupassen

## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken

---

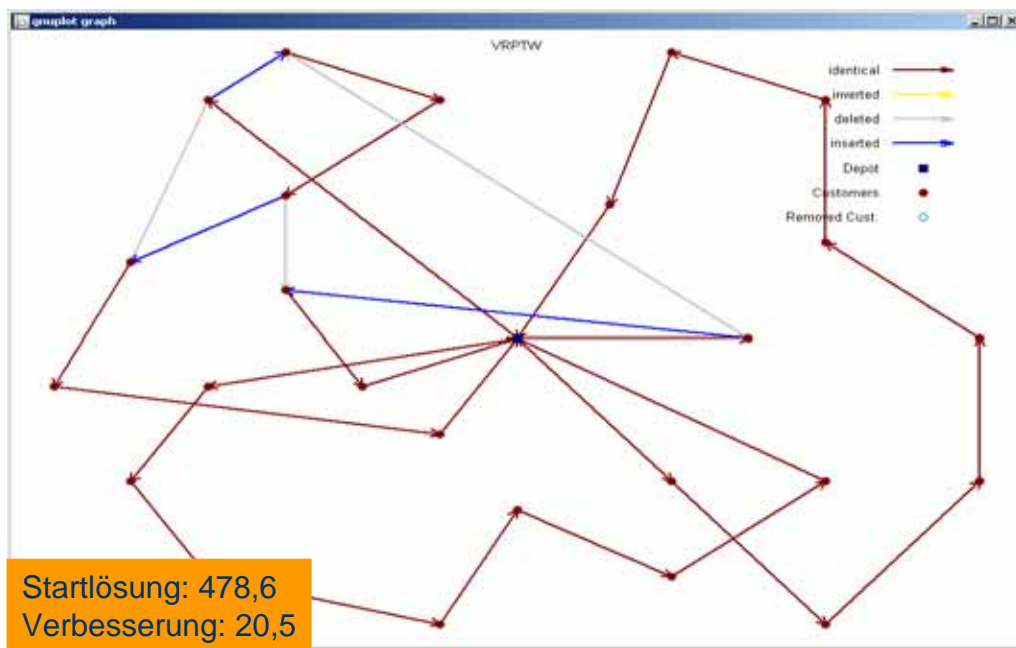
- Lokale Suche und nachbarschaftsbasierte Verfahren sind die am häufigsten benutzten heuristischen Methoden
  - als „reine“ Verbesserungsverfahren
  - in Metaheuristiken (TS, SA, VNS, hybrid GA, ...)

### Prinzip:

- „Lokale“ Veränderung einer aktuellen Lösung mit dem Ziel, hierdurch eine bessere Lösung erzeugen



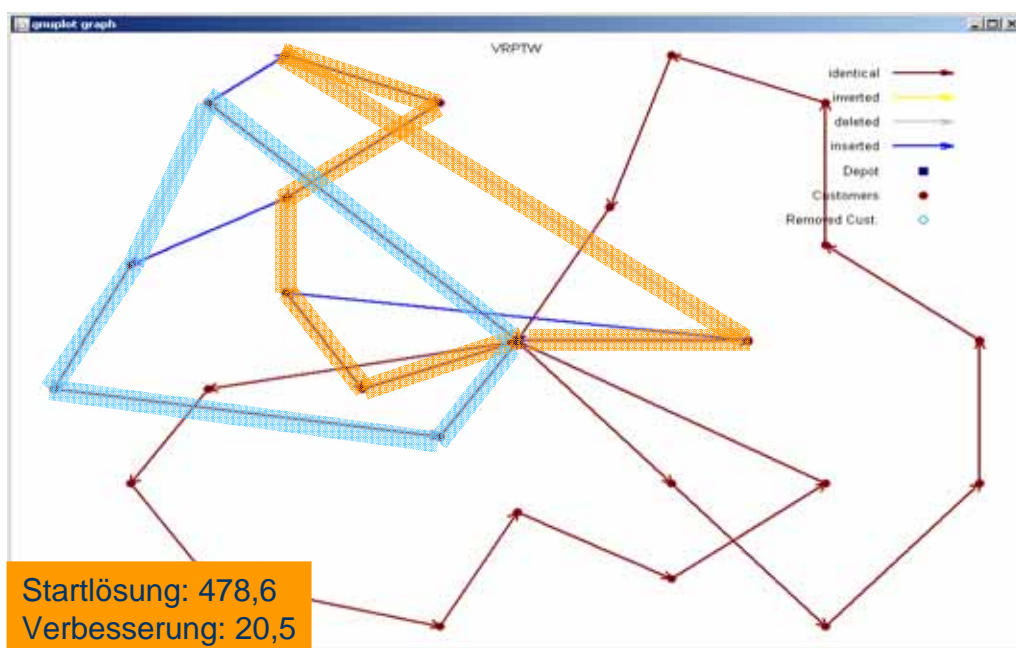
## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken



Stefan Irnich

-15-

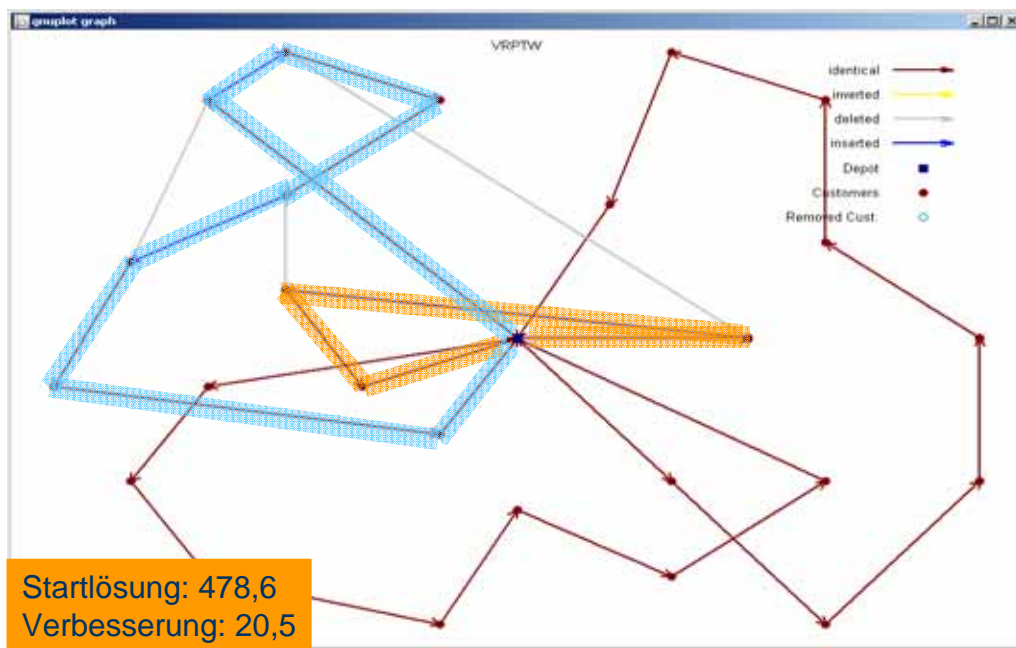
## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken



Stefan Irnich

-16-

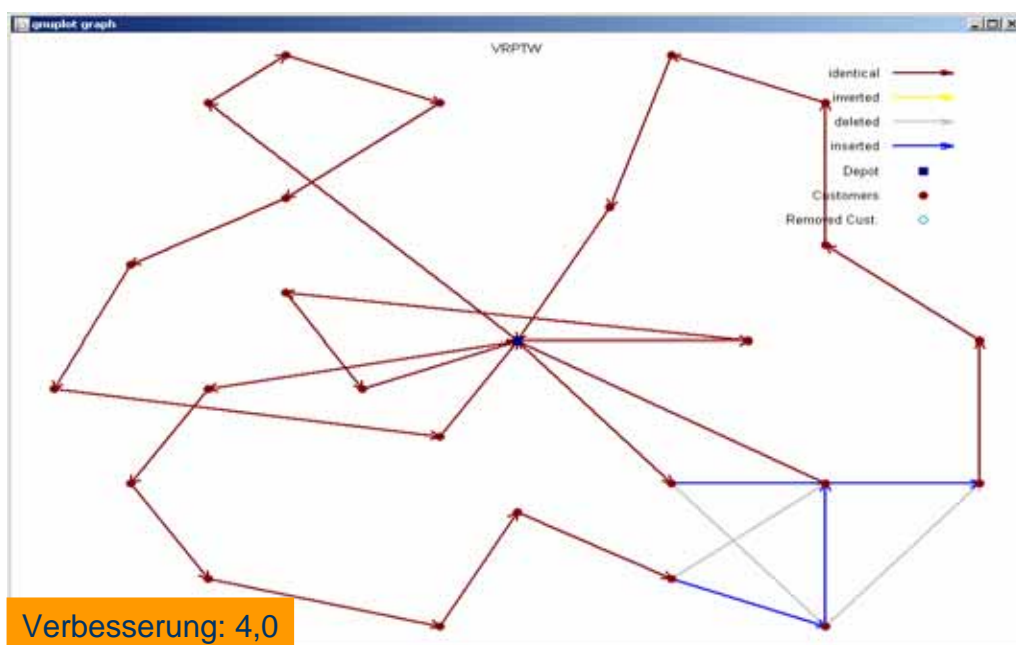
## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken



Stefan Irnich

-17-

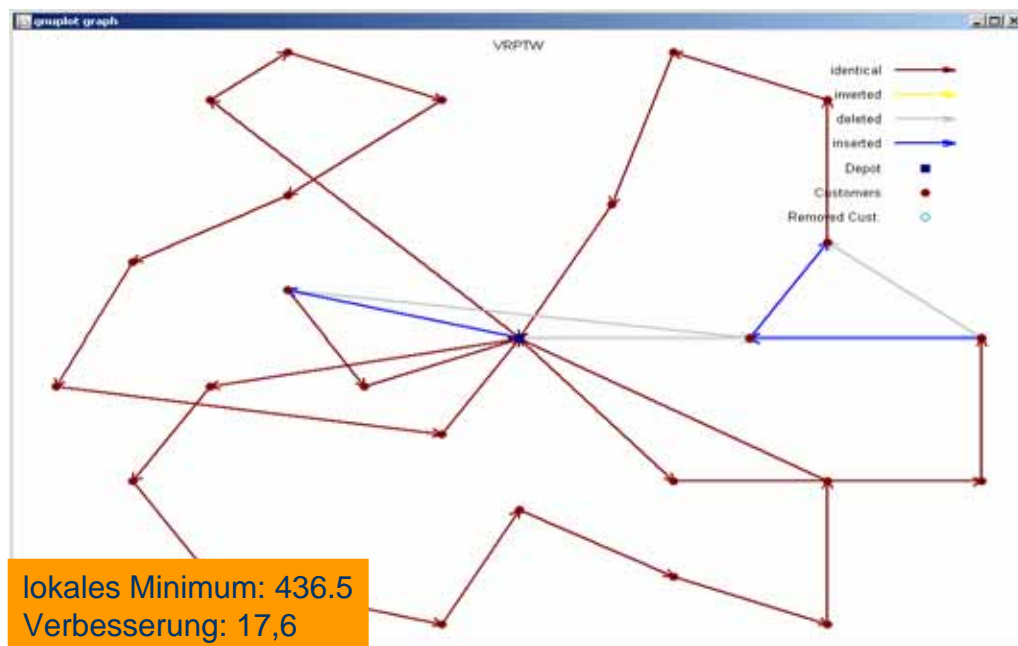
## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken



Stefan Irnich

-18-

## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken



Stefan Irnich

-19-

## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken

### Einige Definitionen:

- **Kombinatorisches Optimierungsproblem**  $P=(X,c)$ :  
 $\min c(x)$ , so daß  $x \in X$
- $X$  zulässige Lösungen,  $c$  Kostenfunktion
- **Nachbarschaft**  $N$ ,  $N: X \rightarrow \text{Pot}(X)$
- $x' \in N(x)$  **Nachbarlösung** von  $x$
- $x' \in N(x)$  mit  $c(x') < c(x)$  **verbessernder Nachbar** von  $x$

Stefan Irnich

-20-

## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken

### Algorithm /\* Generic Local Search \*/

1. **SET**  $x^0 \in X$ ,  $t := 0$ .
2. **REPEAT**
3.   Search for an improving neighbor  $x' \in N(x^t)$  of the current solution  $x^t$ .
4.   **IF** there exists an improving neighbor  $x' \in N(x^t)$   
           **THEN** set  $x^{t+1} := x'$  and  $t := t + 1$ .
5. **UNTIL** no improving neighbor found.

Möglichkeiten in Schritt 3.: Benutze beste verbessernde Lösung (oder erste oder „beste-aus- $k$ “)

Stefan Irnich

-21-

## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken

Beziehung zwischen **Nachbarschaften** und **Moves**:

- Alle Lösungen  $Z \supseteq X$  zulässige Lösungen
- **Move**  $m: Z \rightarrow Z$
- $M$  Menge aller Moves
- **Zulässiger Move**  $m$  bzgl.  $x \in X$  :  $\Leftrightarrow m(x) \in X$
- $N(x) = \{ m(x) : m \in M, m(x) \in X \}$
- “Zulässiger Move”  
 = “Manipulation der aktuellen Lösung + Zulässigkeitsprüfung”

Stefan Irnich

-22-

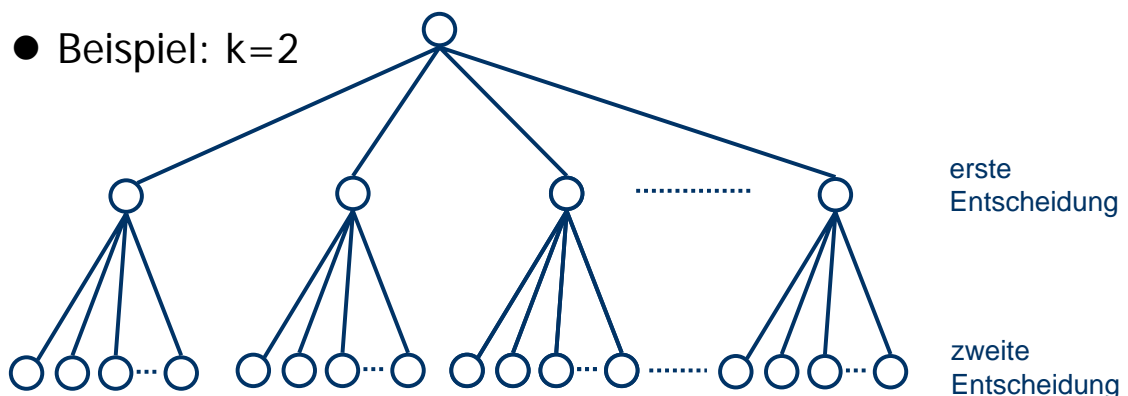
## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken

Gegeben: Zulässige Lösung  $x \in X$   
und Nachbarschaft  $N$

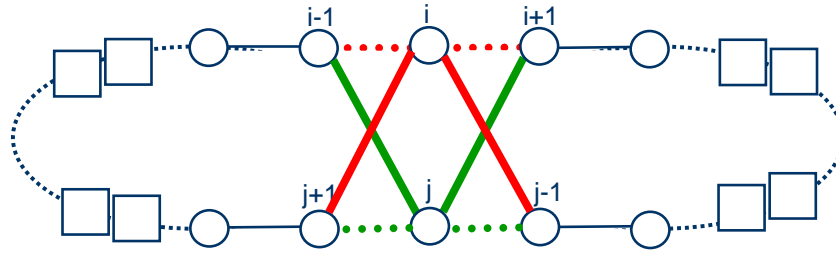
**Wie kann man einen besten  
verbessernden Nachbarn  $x' \in N(x)$   
schnell finden?**

## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken: Allgemeines Prinzip

- Jede Art von enumerativer Suche kann als **Baumsuche** aufgefaßt werden
- Typisch: **k** unabhängige Entscheidungen  
=> Nachbarschaft der Größe  **$O(n^k)$**
- Beispiel:  $k=2$



## 2.1 Lösungsframework für "Rich" VRP: Swap Nachbarschaft



- $O(n^2)$  Nachbarschaft
- "Traditionelle"  
lexikographische  
Suche
- Zwei verschachtelte  
Schleifen über alle  
Paare von Knoten

```

1. LOOP pos[i]
2.   LOOP pos[j] with pos[j] > pos[i] + 1
3.     LET gain = c(i-1,i)+c(i,i+1)
               - c(i,j-1) - c(i,j+1)
               + c(j-1,j)+c(j,j+1)
               - c(j,i-1) - c(j,i+1);
4.     IF ( feasible and improving )
5.       STORE gain and pos[i], pos[j]
  
```



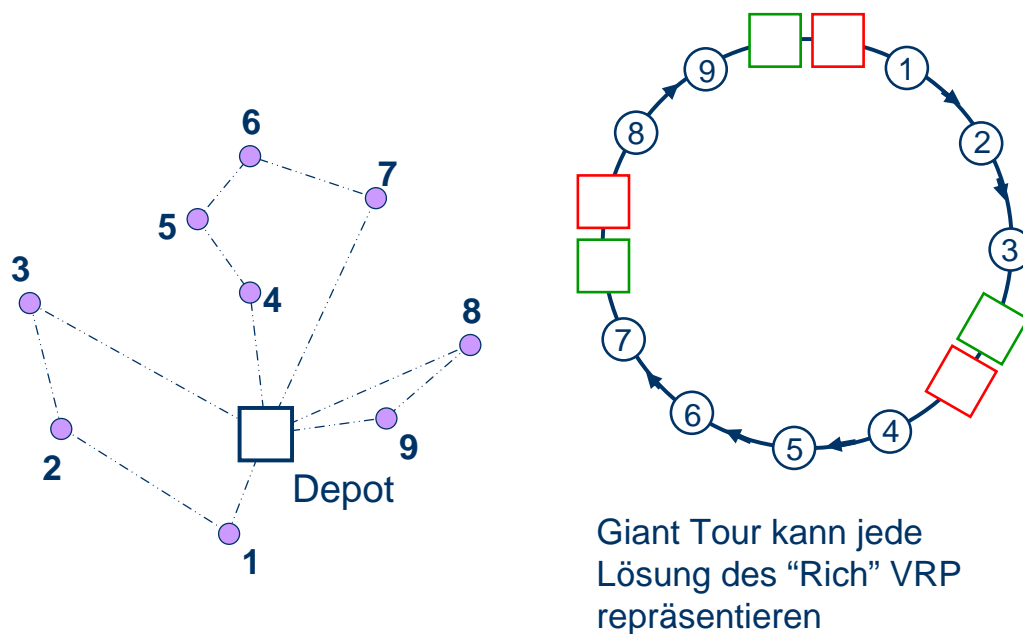
$O(n^3)$  Suchalgorithmus wegen  
**Aufwand für Zulässigkeitsprüfung**

## 2.1 Lokale Suche und Suchtechniken

Vier wesentliche Komponenten:

- Giant-Tour-Repräsentation
- Anpassung Ressourcen-beschränkter Pfade  
an die Giant-Tour-Repräsentation
- Zulässigkeitsprüfung in "konstanter" Zeit  $O(1)$
- „Sequentielle“ Suche

## 2.2 Giant Tour Repräsentation



Stefan Irnich

-27-

## 2.2 Giant Tour Repräsentation

3 Typen von Knoten:

- **Auftragsknoten  $R$** 
  - ein Knoten pro Kunde
  - Paare von Knoten bei P&D, etc.
- **Tour-Start Knoten  $O$  und Tour-Ende Knoten  $D$** 
  - $|O|=|D|$
  - Kompatibilitätsrelation ~ zwischen  $O$  und  $D$
  - z.B. Multi-Depot Probleme:  $O=O_1+\dots+O_g$ ,  
 $D=D_1+\dots+D_g$  mit  $o \sim d, o \in O_i, d \in D_j \Leftrightarrow i=j$

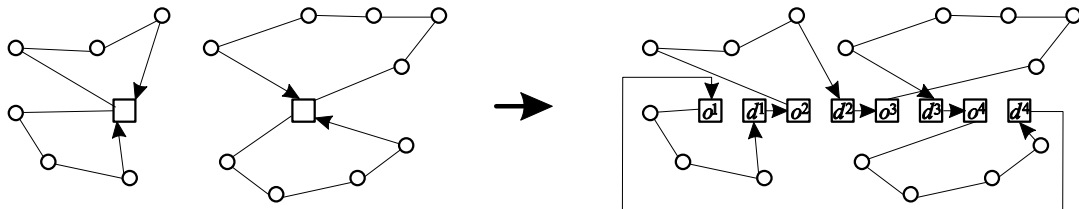
Stefan Irnich

-28-



## 2.2 Giant Tour Representation

- Beispiel: 2-Depot VRP mit 2 Touren an jedem Depot



## 2.2 Giant Tour Representation

### Vorteile der Giant Tour Darstellung:

- Behandlung von mehreren Routen wie eine einzelne Tour (TSP)
- Identische Repräsentation für "inner-tour" Moves und "inter-tour" Moves
- Einfacher Zulässigkeitstest:
  - Giant Route besteht aus Pfaden  $(p^1, \dots, p^H)$
  - jeder Pfad hat Form  $o^i \rightarrow \text{---} \rightarrow d^i$
  - kompatible Tour-Start und Tour-End Knoten
  - $(p^1, \dots, p^H)$  ist Ressourcen-zulässiger Pfad

## 2.3 Ressourcen-beschränkte Pfade

---

- Sehr flexibles und **mächtiges "Werkzeug"** zur **Modellierung** von Vehicle Routing und Crew Scheduling Problemen
- In Lösungsverfahren bisher ausschließlich innerhalb von (exakten) Column-Generation-Verfahren benutzt

G. Desaulniers, J. Desrosiers, I. Ioachim, M.M. Solomon, F. Soumis, D. Villeneuve, A Unified Framework for Deterministic Time Constrained Vehicle Routing and Crew Scheduling Problems, in: *Fleet Management and Logistics*, T.G. Crainic and G. Laporte (eds.), Kluwer Academic Publisher, 1998.

S. Irnich, G. Desaulniers, Shortest Path Problems with Resource Constraints, in: *Column Generation*, G. Desaulniers, M.M. Solomon, J. Desrosiers, Kluwer Academic Press, 2005.

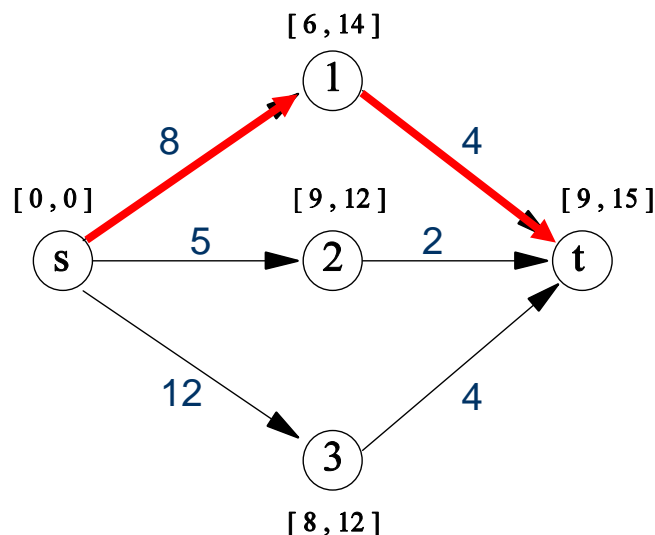
## 2.3 Ressourcen-beschränkte Pfade

---

- **Sicherung der Zulässigkeit einzelner Touren**, insbesondere für folgende Typen von Nebenbedingungen
  - Kapazitäten (auch simultanes Ausliefern und Abholen)
  - Längenbeschränkungen (Distanz, Zeit, ...)
  - (mehrfache) Zeitfenster
  - beschränkte Arbeitszeiten/Wartezeiten
  - Vorrang- und Paarrestriktionen
  - (In)Kompatibilitäten
  - Mehrfacheinsatz von Fahrzeugen
  - ...
- Abbildung komplexer Kostenfunktionen

## 2.3 Ressourcen-beschränkte Pfade

Beispiel: Ressource "Zeit" (Reisezeiten und Zeitfenster)

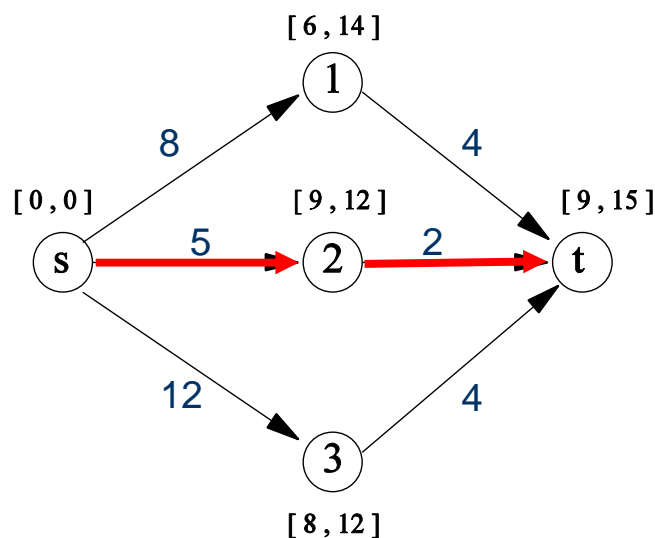


Zeit am Knoten s:  $T_s=0$   
 Zeit am Knoten 1:  $T_1=8$   
 Zeit am Knoten t:  $T_t=12$

Pfad (s,1,t) ist  
 Ressourcen-zulässig

## 2.3 Ressourcen-beschränkte Pfade

Beispiel: Ressource "Zeit" (Reisezeiten und Zeitfenster)

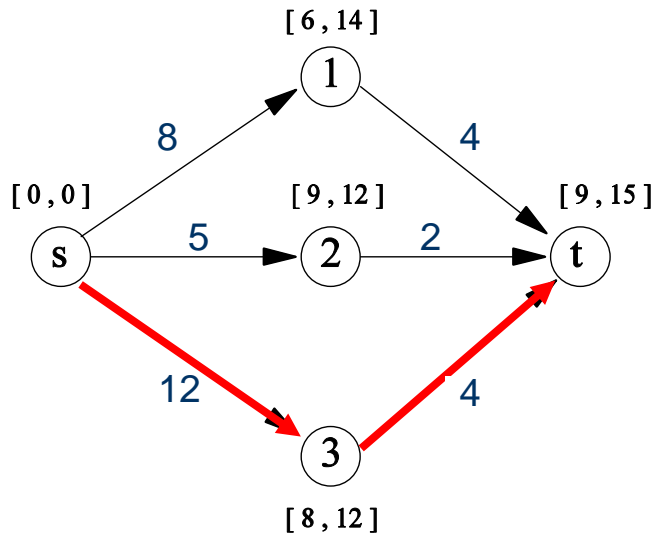


Zeit am Knoten s:  $T_s=0$   
 Zeit am Knoten 2:  $T_2=9$   
 (Warten!)  
 Zeit am Knoten t:  $T_t=11$

Pfad (s,2,t) ist  
 Ressourcen-zulässig

## 2.3 Ressourcen-beschränkte Pfade

Beispiel: Ressource "Zeit" (Reisezeiten und Zeitfenster)



Zeit am Knoten s:  $T_s=0$   
 Zeit am Knoten 3:  $T_3=12$   
 Zeit am Knoten t:  $T_t=16$

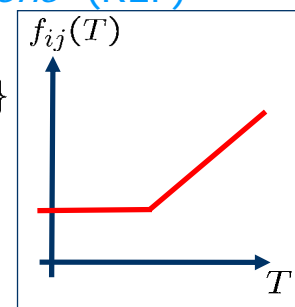
Pfad (s,3,t) ist NICHT  
 Ressourcen-zulässig

## 2.3 Ressourcen-beschränkte Pfade

Verallgemeinerung:

- **mehrdimensionale** Ressourcenvektoren  
(Kosten, Zeit, Landung, ...)
- mehrdimensionale **Ressourcenintervalle**  
 $[a_i, b_i] \in \mathbb{R}^R \times \mathbb{R}^R$  an allen Knoten  $i$
- "Klassische" **Resource Extension Functions (REF)**  
 der Form  $f_{ij} : \mathbb{R}^R \rightarrow \mathbb{R}^R$

$$f_{ij}(T) = \max\{T + t_{ij}, a_j\}$$



## 2.3 Ressourcen-beschränkte Pfade

Im Kontext der Giant Route:

- gewöhnliches Resource-Update entlang der Touren
- **“Reset” von Ressourcen**, wenn eine neue Tour beginnt (außer für Kosten und andere “inter-tour” Ressourcen), d.h. für Bögen  $(d,o)$ :

$$f_{do} : \mathbb{R}^R \rightarrow \mathbb{R}^R$$
$$f_{do}(T) = \max\{T + (0, -\infty, -\infty, \dots, -\infty), a_o\}$$

## 2.4 Zulässigkeitstest in $O(1)$

Konzept der **“globalen Variablen”**

(Kindervater & Savelsbergh, 1997) ermöglicht in Spezialfällen die Zulässigkeitsprüfung in  $O(1)$

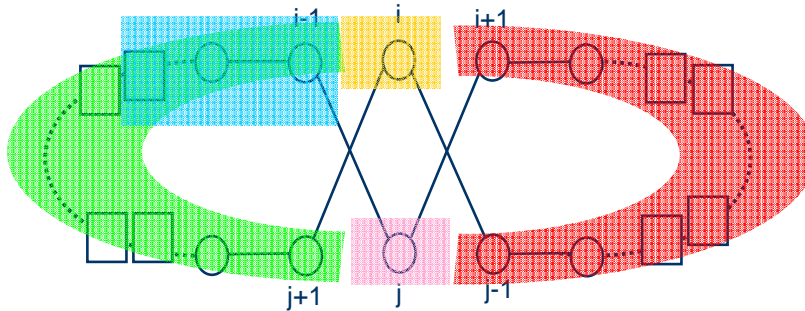
- Abschneiden des Suchbaums aufgrund von **Zulässigkeitsüberlegungen**
- Nachteil: Kein Abschneiden aufgrund von **Kosten-/Gewinnüberlegungen** möglich

**Neuer Beitrag:**

- Mehr Flexibilität in der Baumsuche
- Kombination von **Kosten- und Zulässigkeitsüberlegungen** zum Abschneiden des Suchbaums

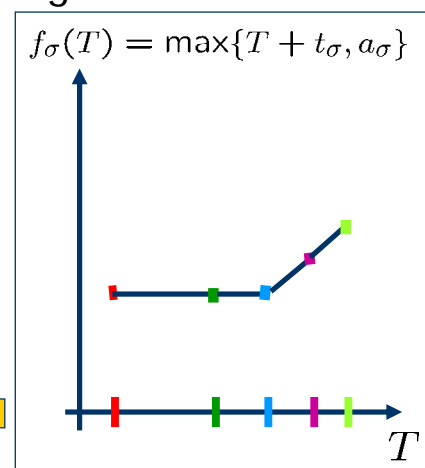
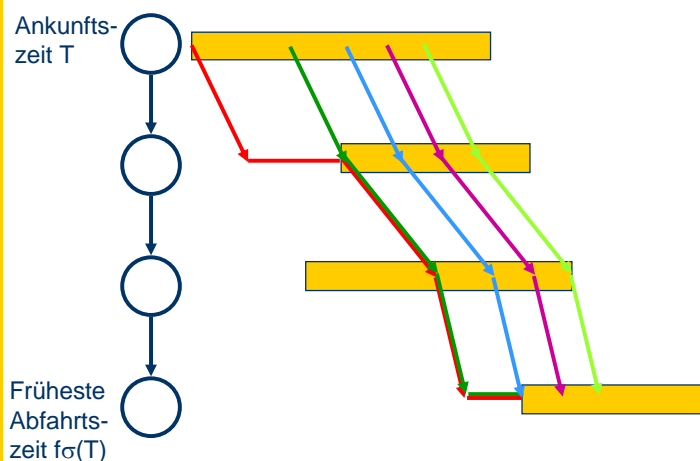
## 2.4 Zulässigkeitstest in $O(1)$

- Jeder Move zerlegt die Giant-Tour in eine (kleine) Anzahl von Segmenten



## 2.4 Zulässigkeitstest in $O(1)$

- Jeder Move zerlegt die Giant-Tour in eine (kleine) Anzahl von Segmenten
- REFs können auf Segmente  $\sigma$  verallgemeinert werden



## 2.4 Zulässigkeitstest in $O(1)$

- Zulässigkeitsprüfung erfordert  $O(1)$  Zeit, wenn REFs für jedes mögliche Segment (vorab) berechnet wird
  - Einige (technische) Voraussetzungen über REFs notwendig!
- Aber: **Preprocessing** erforderlich!
  - Naive Implementierung:  $O(n^2)$  Zeit und Speicher
  - Wesentlicher Trick: Implementierung mit  $O(n^{4/3})$  Zeit und Speicher

## 2.4 Zulässigkeitstest in $O(1)$

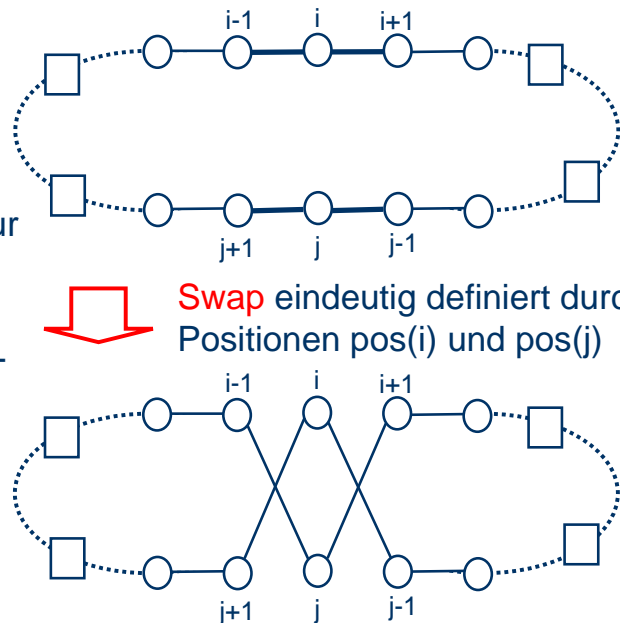
### Wesentliche Resultate:

- Lokale Suche kann für  $O(n^k)$  Nachbarschaften mit lexikographischer Suche in
  - $O(n^k)$  Zeit und
  - $O(n^{4/3})$  Speicher
- mit sequentieller Suche im Average-Case in
  - weniger als  $O(n^k)$  Zeit und
  - $O(n^{4/3})$  Speicherdurchgeführt werden



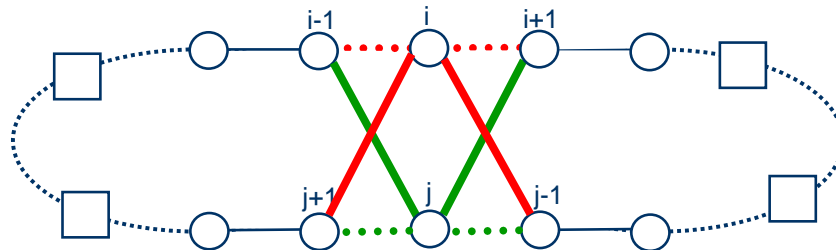
## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft

- Swap (=Austausch) von 2 Knoten  $i$  und  $j$
- zulässig, wenn
  - $i$  und  $j$  in derselben Tour
  - $i$  und  $j$  in unterschiedlichen Touren und Kapazitätsrestriktionen nicht verletzt
- Größe der Nachbarschaft:  $O(n^2)$



Swap eindeutig definiert durch Positionen  $\text{pos}(i)$  und  $\text{pos}(j)$

## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft



### Sequentielle Suche:

- Innere Schleife nur über "nah" zu  $i$  gelegene Knoten  $k$
- Zwei Fälle:
  - $j$  ist Nachfolger von  $k$
  - $j$  ist Vorgänger von  $k$

```

1.  LOOP pos[i]
2.    bound = (c(i-1,i)+c(i,i+1))/2;
3.    LOOP k ∈ NL(i) with c(i,k) < bound
4.      (a) LET pos[j] = pos[k]+1
5.          LET gain = ...;
6.          IF ( feasible and improving )
7.            STORE gain and pos[i], pos[j]
8.      (b) LET pos[j] = pos[k]-1
9.          LET gain = ...;
10.         IF ( feasible and improving )
11.           STORE gain and pos[i], pos[j]

```

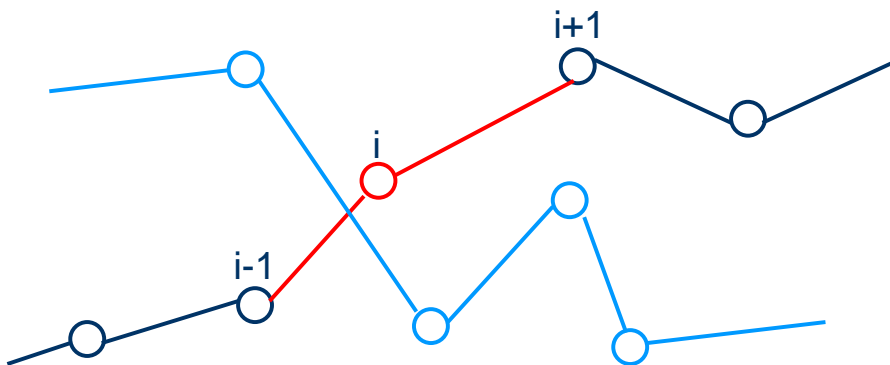
## 2.5 Sequentielle Suche: Allgemeines Prinzip

- Gewinn  $G = g_1 + g_2$
- $G > 0$  impliziert  $g_1 > 0$  oder  $g_2 > 0$
- In einem verbessernden Move sind bei einem Teilschritt die eingefügten Kanten kürzer als die gelöschten Kanten

● Insbesondere: In einem der Teilschritte muß eine der eingefügten Kanten kürzer sein als die durchschnittliche Länge der zwei gelöschten Kanten

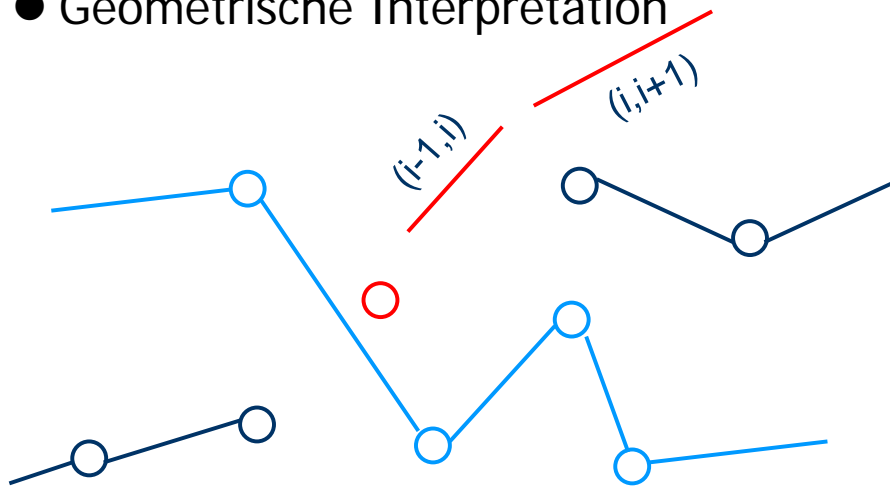
## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft

- Geometrische Interpretation



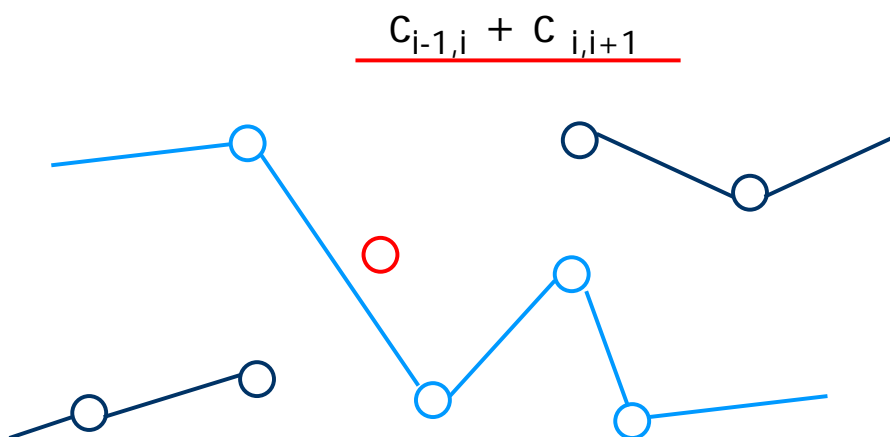
## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft

### ● Geometrische Interpretation



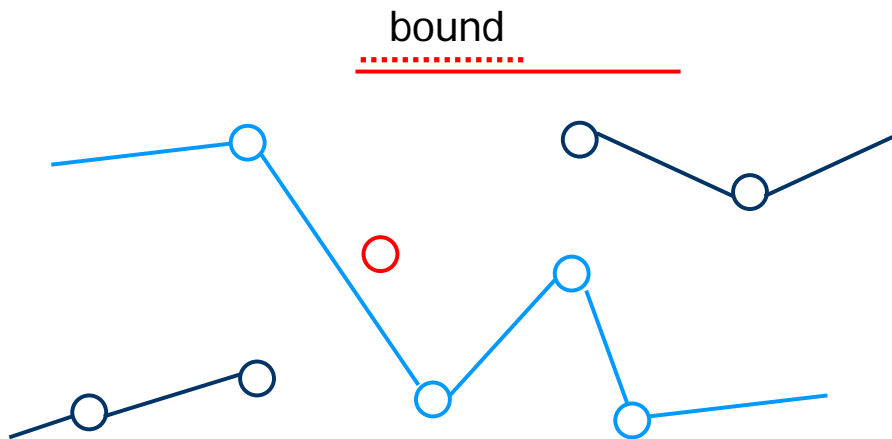
## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft

### ● Geometrische Interpretation



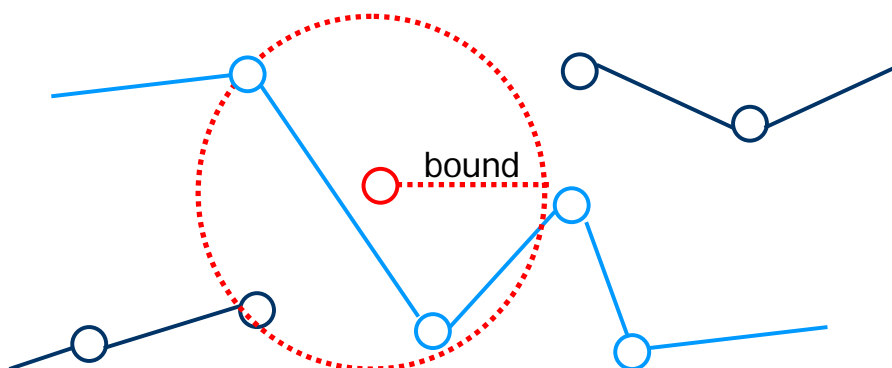
## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft

- Geometrische Interpretation



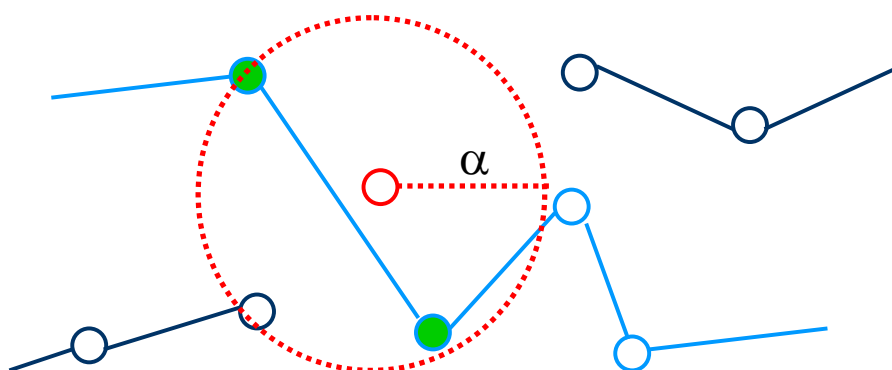
## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft

- Geometrische Interpretation



## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft

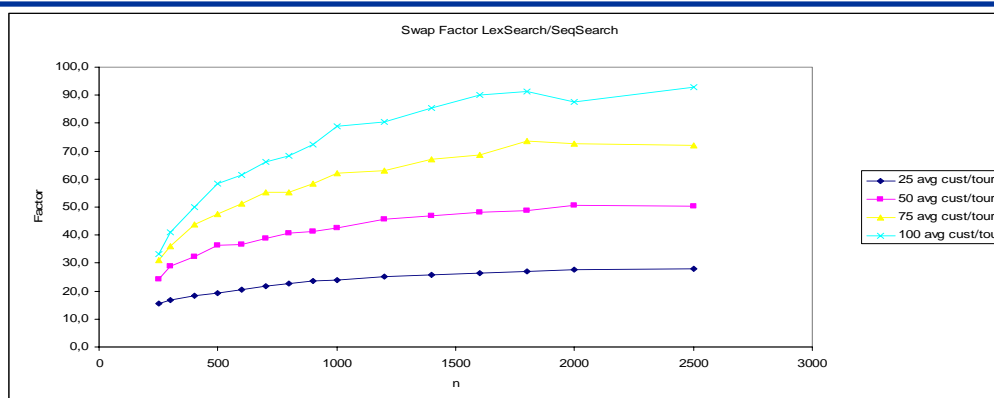
### ● Geometrische Interpretation



Stefan Irnich

-51-

## 2.5 Sequentielle Suche: Swap Nachbarschaft



Vergleich "traditioneller" lexikographischer Suche mit  
sequentieller Suche:

- CVRP mit 250 – 2500 Kunden
- Nachfrage so, daß durchschnittlich etwa 25, 50, 75 oder 100 Kunden pro Tour bedient werden

Stefan Irnich

-52-

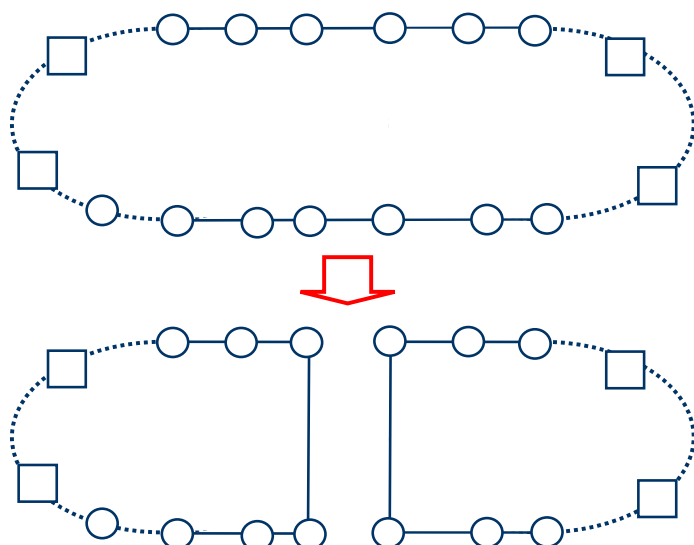
## 2.5 Sequentielle Suche: Allgemeines Prinzip

Sequentielle Suche anwendbar auf eine  
Vielzahl von **VRP Nachbarschaften**:

- 2-Opt und 2-Opt\*
- Relocation und Or-Opt (=string relocation)
- 3-Opt und 3-Opt\*
- Große Teilmengen von k-Opt und k-Opt\*,  $k \geq 4$
- Node Ejection Chains
- ... (und andere)

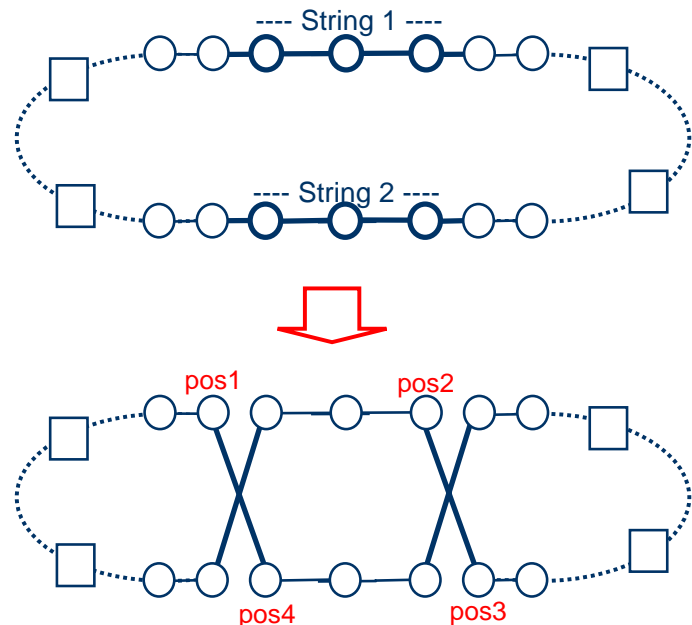
## 2.5 Sequentielle Suche: 2-Opt\*

- Zwei Touren  
tauschen  
ihre „Endstücke“
- Größe der  
Nachbarschaft:  
 $O(n^2)$



## 2.5 Sequentielle Suche: String Exchange

- Austausch von zwei Strings
- String beschränkter Länge  $k$ , z.B.  $k < 4$
- Größe der Nachbarschaft:  
 $O(k^2 n^2) = O(n^2)$

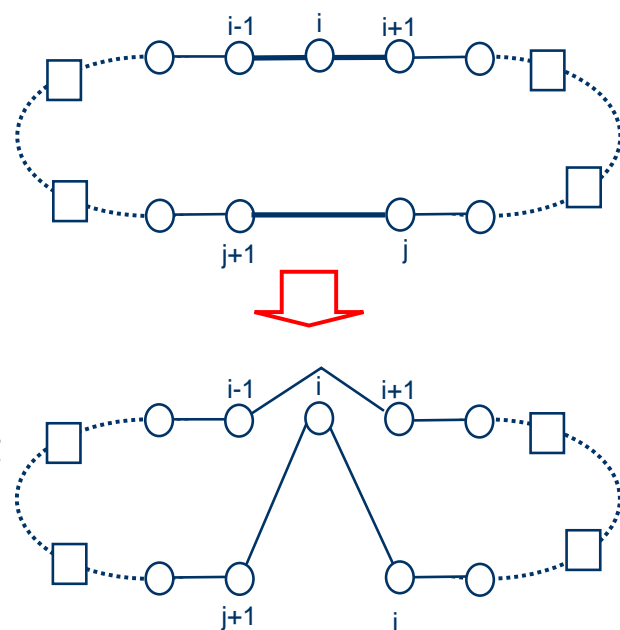


Stefan Irnich

-55-

## 2.5 Sequentielle Suche: Relocation & Or-Opt

- Verschieben eines Knotens, „2.5-Opt“ (Bentley 1992)
- Größe der Nachbarschaft:  $O(n^2)$
- Erweiterung zu Or-Opt Nachbarschaft
  - Verschieben eines Strings beschränkter Länge  $k$



Stefan Irnich

-56-



### 3 Ergebnisse für CVRP (Grundproblem)

- Starke Beschleunigung der Suche für verschiedene Typen von Nachbarschaften:

- 2-Opt\*: Faktor 10 – 90
- 2-Opt: Faktor 5 – 35
- relocation: Faktor 10 – 60
- Or-Opt: Faktor 20 – 125
- swap: Faktor 15 – 90
- string exchange: Faktor 20 – 700
- 3-Opt\*: Faktor 300 – >7500

Instanzen mit  $n=100$  bis  $n=3000$  Kunden

### 3. Ergebnisse für VRP mit Zeitfenstern

#### Rechenergebnisse **VRPTW**

- Vergleich: lexikographische vs. sequentielle Suche
- Beschleunigung: (min/max)
  - 2-Opt\*: Faktor 2 – 30
  - 2-Opt: Faktor 4 – 33
  - swap: Faktor 1.6 – 30
  - string exchange: Faktor 2.3 – 100
  - Or-Opt: Faktor 2.1 – 42
  - Or-Opt (unrest.): Faktor 4.2 – 375
- Instanzen mit  $n=100$  bis  $n=1000$  Kunden (Solomon 1987, Homberger 1998)

### 3. Ergebnisse für periodische VRP

#### Modellierung von periodischen VRP

- Tour-Start- und Tour-End-Knoten  
für jedes Fahrzeug und jeden Wochentag
- Knoten für jeden Kunden/Wochentag (=Tasks)
- Ressourcen sichern das Einhalten der  
Besuchsmuster
- Test-Instanzen mit  $n=80$  bis zu  $n=918$  Tasks  
(Cordeau et al. 1997)

### 3. Ergebnisse für periodische VRP

#### Rechenergebnisse für periodische VRP

- Vergleich: lexikographische vs. sequentielle Suche
- Beschleunigung:
 

	(min/max)	(avg)
● 2-Opt*:	Faktor 4 – 160	21
● 2-Opt:	Faktor 6 – 63	22
● swap:	Faktor 5 – 450	115
● string exchange:	Faktor 5 – 250	76
● Relocation:	Faktor 3.3 – 250	43
● Or-Opt:	Faktor 3.1 – 175	32
● Or-Opt (unrestr.):	Faktor 3.5 – >2000?	165
- Instanzen mit  $n=80$  bis  $n=918$  Tasks  
(Cordeau et al. 1997)

### 3. Ergebnisse für Multi-Depot VRP

#### Rechenergebnisse für MDVRP

- Vergleich: lexikographische vs. sequentielle Suche
- Beschleunigung:
 

	(min/max)	(avg)
● 2-Opt*:	Faktor 5 – 92	22
● 2-Opt:	Faktor 3.8 – 32	13
● swap:	Faktor 10 – 60	23
● string exchange:	Faktor 4.2 – 60	24
● Relocation:	Faktor 6 – 52	30
● Or-Opt:	Faktor 3.8 – 30	15
● Or-Opt (unrestr.):	Faktor 5 – 250	78
- Instanzen mit  $n=50$  bis  $n=360$  Kunden  
(Cordeau et al. 1997)

### 3. Ergebnisse für weitere "Rich" VRP

#### Ähnliche Resultate:

- Pickup & Delivery: PDPTW
  - Eine Ressource für jeden Auftrag  $r_i = (p_i, d_i)$   
(binäre Repräsentation  
=> bis zu 16 Ressourcen auf 32-Bit CPU)
- Simultaneous Delivery & Pickup  
mit Zeitfenstern
- VRP mit Backhauling

## 4. Zusammenfassung

---

### Anforderungen aus Praxis und Trends in der Wissenschaft:

- Größere Probleme schneller lösen
  - Beschleunigung,  
Steigerung von Effizienz und Effektivität
- „Rich“ VRP
  - Realitätsnahe Modelle
  - Einfache aber flexible und leistungsfähige Lösungsverfahren

## 4. Zusammenfassung

---

### Eigener Beitrag:

- Effiziente lokale Suche
  - als Baustein innerhalb nachbarschaftsbasierter (Meta)Heuristiken
- Ein Modellierungs- und Lösungsframework, basierend auf „Ressourcen-beschränkten Pfaden“
  - zur Modellierung von „Rich“ VRP (insbesondere in der „heuristischen Welt“)
  - erstmals als integraler Bestandteil eines effizienten heuristischen „generischen“ Lösungsverfahrens
  - tiefgehende theoretische Analyse (Eigenschaften von REF, Möglichkeiten und Grenzen)

# **Kurzfristige und mittelfristige Wirkungen der Veränderung von Transportdispositions-Regeln**

**Dr. Jörn Schönberger**

**Universität Bremen**

## Kurzfristige und mittelfristige Wirkungen der Veränderung von Transportdispositions-Regeln

### Adaptives Lastspitzen-Management in Transportsystemen

- **Dynamisches Entscheidungsproblem**
- **Online-Optimierung mit Instanzen-Preprocessing**
- **Numerische Experimente und Ergebnisse**

Jörn Schönberger  
sberger@logistik.uni-bremen.de

Lehrstuhl für Logistik, SFB 637 „Selbststeuerung in der Logistik“

## Entscheidungsproblem

LfL - Chair of Logistics  
SFB 637

- **Ressourcen: Fahrzeuge mit Reparaturteams**
- **Aufträge**
  - Besuch von Kundenorten
  - Bekanntgabe: sukzessive und unvorhersagbar
  - Besuchszeitfenster werden vorab vereinbart
- **Fremdvergabe ausgewählter Aufträge möglich**
- **Konstruktion von Routen für die eigenen Fahrzeuge**
- **Zielsetzungen bei der Routenplanung**
  - kurzfristig: Effizienzmaximierung (Kosten!)
  - mittelfristig: Zuverlässigkeit (Pünktlichkeit!)

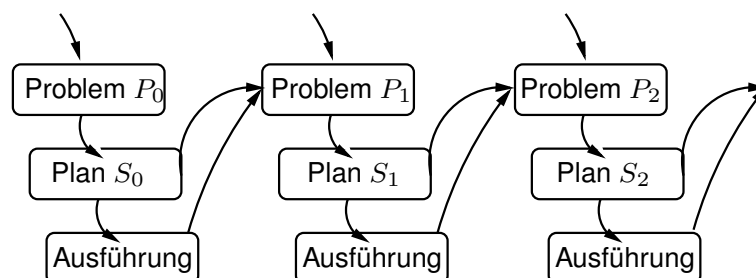
## Literatur

- Problemstellung
  - Variation des Multi-Vehicle Selective Routing Problems mit Zeitfenstern
  - dynamisch, nicht-deterministisch, nicht-stochastisch
- Ansätze zur Behandlung der Dynamik und Unsicherheit
  - Konstruktion von robusten a-priori-Routen
  - flexible Routen werden reaktiv neugeplant

Jörn Schönberger · GOR-Workshop Bonn · 3/14

## Modellierung

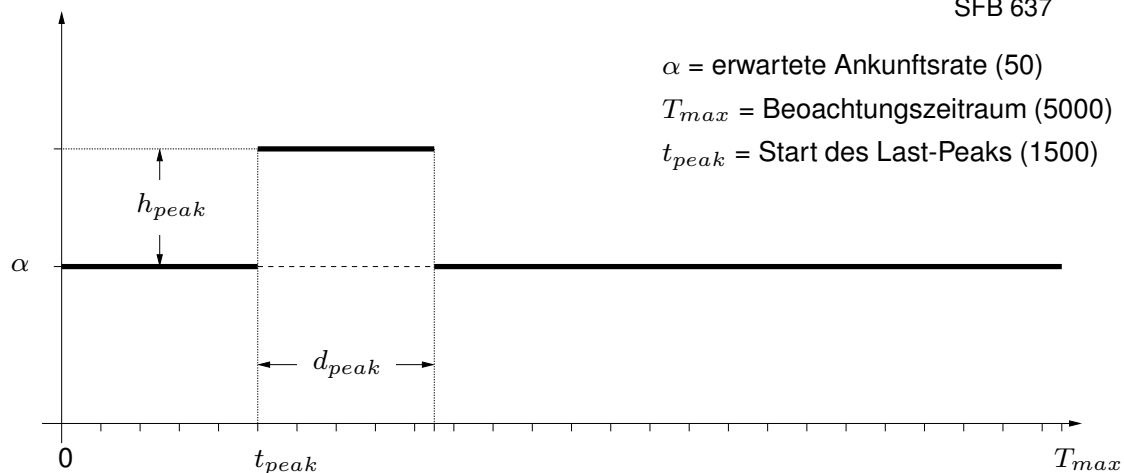
### ■ Online-Entscheidungsmodell



- Entscheidungsproblem-Instanz  $P_i$  zum Zeitpunkt  $t_i$ 
  - Minimierung der Kosten:  
$$C_{\text{gesamt}} = C^{\text{Selbsteintritt}} + C^{\text{Fremdvergabe}} + C^{\text{Strafkosten}}$$
  - Routenkonstruktionsbedingungen
  - Fremdvergabe-Entscheidung für Auftrag  $r$ :  $y_r \in \{0, 1\}$

Jörn Schönberger · GOR-Workshop Bonn · 4/14

## Untersuchte Problem instanzen



Testinstanz bestimmt durch  $(\mathcal{P}, d_{peak}, h_{peak})$

- $\mathcal{P}$ : Solomon-Instanz, aus der Aufträge gezogen werden
- $d_{peak}$ : Dauer des Peaks
- $h_{peak}$ : Schwere des Peaks (zusätzliche Aufträge)

## Problemsdekomposition

- zeitlich-kausale Dekomposition
  - mittelfristig: Pünktlichkeit sichern/wiederherstellen
  - kurzfristig: offene Aufträge kostenminimal erfüllen
- Sicherstellung / Wiederherstellung der Pünktlichkeit
  - $\phi$ -Pünktlichkeitsrate  $p_t$  in gleitendem Zeitfenster
  - extern vorgegebene Mindestpünktlichkeitsrate  $p^{target}$
  - $p_t < p^{target}$ : Anpassung Dispositionsverhalten
- Kostenoptimierung
  - Optimierung: Routenbildung und Fremdvergabe
  - Anwendung der angepassten Dispositionsstrategie



## Dispositions-Strategien

- Parametrisierung eines Entscheidungsverfahrens
- Ansatz: Beeinflussung der Fremdvergabe-Entscheidung
  - Ausnutzen der Pünktlichkeits-Gewährleistung
  - Ziel: Wiedererreicherung der Mindestrate  $p^{target}$
- bei ausreichender Pünktlichkeit (d.h.  $p_t \geq p^{target}$ )
  - freie Wahl zwischen Fremdvergabe & Selbsteintritt
  - „Default“-Strategie
- bei zu geringer Pünktlichkeit (d.h.  $p_t < p^{target}$ )
  - zusätzliche weitere Aufträge werden fremdvergeben
  - „Over-Ruling“ des Kostenkriteriums bei Moduswahl

## Strategie-Implementierung

- Strategie-Implementierung  
⇒ Modifikation der nächsten Problem-Instanz

**Zielfunktion**  
Anpassung der Suchrichtung

**Nebenbedingungen**  
Anpassung des Suchraums

**Wertebereiche**  
Anpassung der Domains

- Realisierung: Anpassung der Wertebereiche
  - falls  $p_t < p^{target}$ :  $y_r = 1$  für zukünftige Aufträge  $r$
  - falls  $p_t \geq p^{target}$ :  $y_r \in \{0, 1\}$
  - Modifikation der Wertebereiche ist kontrollierbar!

## Kurzfristiges Scheduling



LfL - Chair of Logistics  
SFB 637

- Ziel: Ableitung des umzusetzenden Transportplans
- Konfiguration eines Memetischen Algorithmus
  - Genetische Suche nach Transportplan-Vorschlägen
  - Verbesserung der Vorschläge durch Hill-Climber
- Einbindung in die dynamische Umgebung
  - Seeding: Verwendung bisheriger Lösung
  - Übernahme des letzten Transportplans
  - Entfernung bereits erledigter Aufträge
  - zufälliges Einfügen der neuen Aufträge

Jörn Schönberger · GOR-Workshop Bonn · 9/14

## Experimente

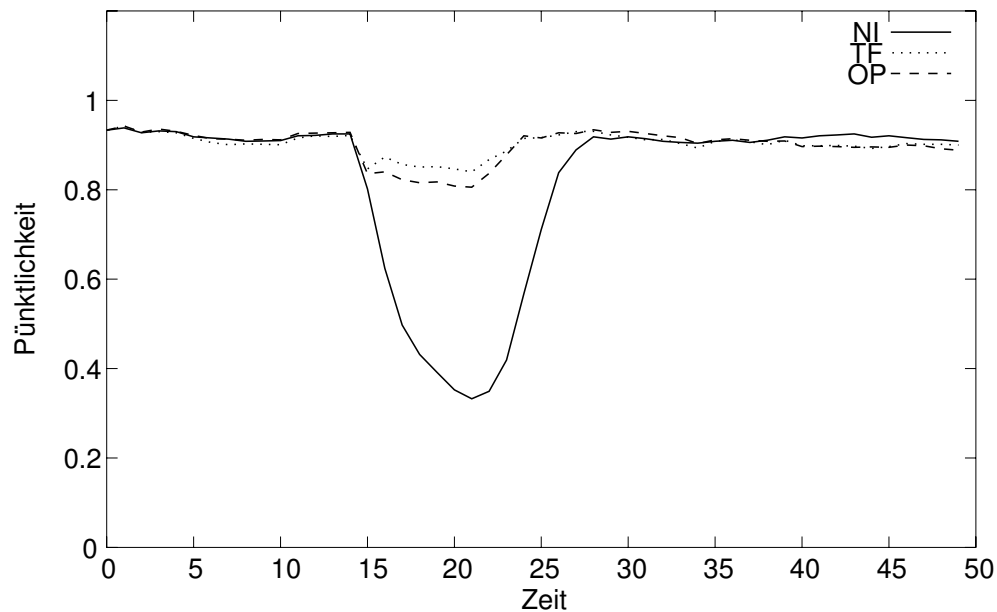


LfL - Chair of Logistics  
SFB 637

- Referenz NI (No Intervention): keine Anpassung
- Aktivierung Zwangsfremdvergabe: sobald  $p_t < p^{target}$
- Deaktivierungs-Strategien
  - TF (Target Fulfilled): Deaktivierung sobald  $p_t \geq p^{target}$
  - OP ( $\omega$ -Premature): Deaktivierung bei  $p_t \geq p^{target} - \omega$
- Parameter
  - Kosten für die Fremdvergabe: 10% über Fahrtkosten
  - $p^{target} = 0.9$ ,  $\omega = 0.05$
  - $d_{peak} = 500$  ZE,  $h_{peak} = 100$  Aufträge

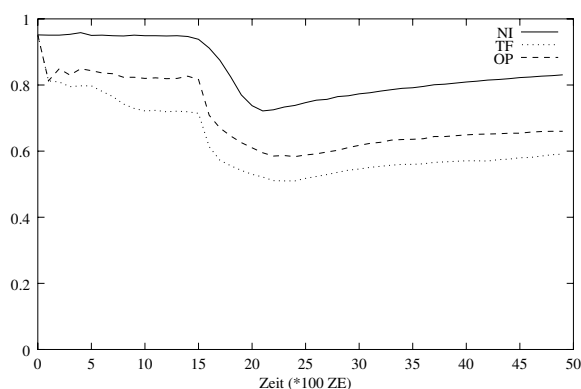
Jörn Schönberger · GOR-Workshop Bonn · 10/14

## Pünktlichkeit

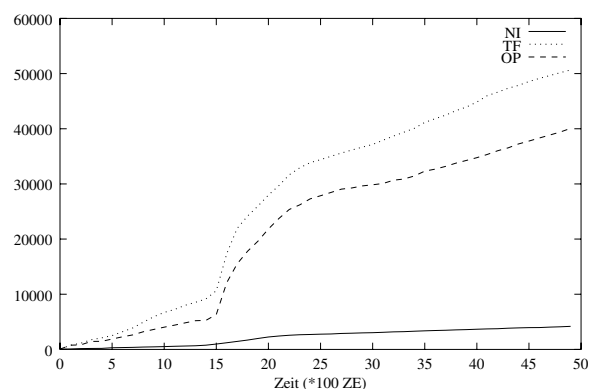


Jörn Schönberger · GOR-Workshop Bonn · 11/14

## Interne System-Neukonfiguration



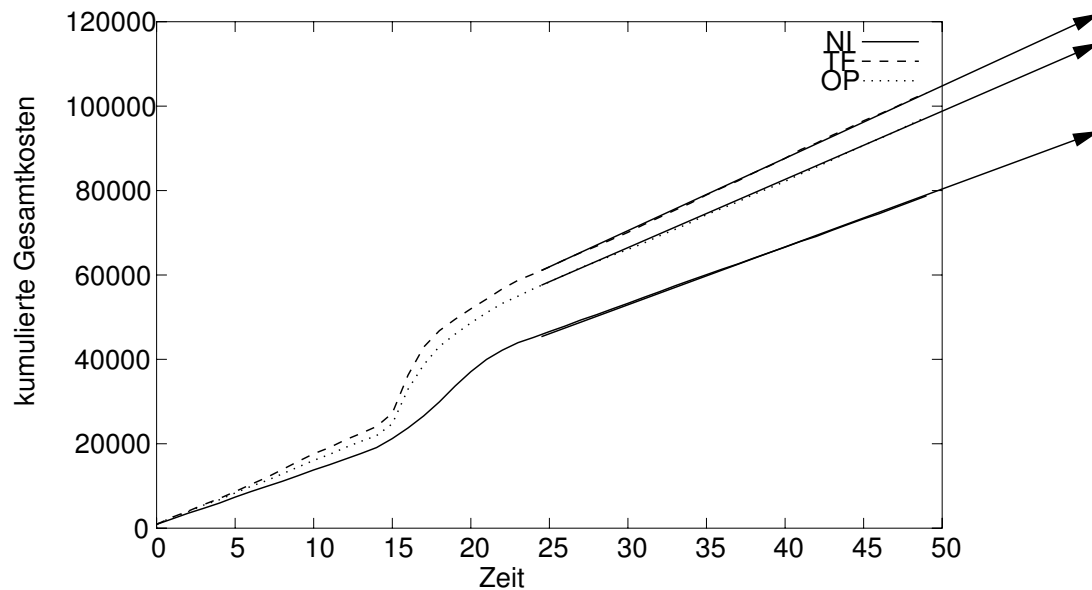
Anteil Selbsteintritt



Fremdvergabekosten (kumuliert)

Jörn Schönberger · GOR-Workshop Bonn · 12/14

## Grenzkosten



Jörn Schönberger · GOR-Workshop Bonn · 13/14

## Zusammenfassung & Ausblick

- Ergebnisse
  - Strategie-Anpassung ist möglich und effektiv
  - Integration kurzfristiger und mittelfristiger Ziele
  - erhöhte Grenzkosten durch System-Umkonfiguration
- nächste Schritte
  - Erprobung weiterer Feedback-Parameter
  - Implementierung von „Inversen Reaktionen“

Jörn Schönberger · GOR-Workshop Bonn · 14/14

# **Ein Multi-Agenten-Ansatz zur dynamischen Planung und Steuerung großer Transportnetwerke in Theorie und Praxis**

**Dr. Klaus Dorer  
Christian Dannegger**

**Whitestein Technologies GmbH  
Donaueschingen**



## GOR-Workshop „Planung von großen Transportnetzwerken“

Ein Multi-Agenten-Ansatz zur dynamischen Planung und Steuerung großer Transportnetzwerke in Theorie und Praxis

Dr. Klaus Dorer, Christian Dannegger  
Bonn, 9. März 2006

wt.gor.mtg | v1.0 | 2006-03-09 | CHD, KDO

Copyright © 2006 by Whitestein Technologies GmbH, Germany  
All rights reserved.

### Firmenprofil



- ❑ Whitestein Technologies gilt als Pionier auf dem Gebiet der sogenannten Agenten-Technologie und des Autonomic Computing
- ❑ Mit agenten-basierten Lösungen von Whitestein Technologies optimieren Unternehmen und Organisationen ihre Abläufe und Prozesse **in Echtzeit**
- ❑ 1996 gegründet als Living Systems
- ❑ 2003 von Whitestein Technologies erworben
- ❑ 4 Standorte, Zürich, Donaueschingen, Bratislava (Slowakei), Sophia Antipolis (Frankreich)
- ❑ Mitarbeiter: ca. 80
- ❑ Das Funktionsspektrum unserer **Industrie-Lösungen** umfasst:
  - Logistikprozesse wie Transport, Produktion und Lieferketten Steuerung
  - Telekommunikationslösungen für Client und Backend, Informationslogistik
- ❑ Die industrie-neutrale **Agenten-Plattform** LS/TS umfasst:
  - AML, Modeler, Developer, Debugger, Tester, Deployer, Visualizer



## The Logistics Environment



- ❑ A very heterogeneous environment with:
  - Many different customers
  - Many different truck characteristics
  - Many different kinds of transportation
  - Many different business structures (processes, culture, IT)
  - Many unexpected events (new/changed orders, traffic jam or other delays)
- ❑ High complexity through interaction between different regional or organizational logistics networks
- ❑ Decentralized responsibilities with overlapping areas
- ❑ Different strategies and approaches for dispatching



## Content



### Problem Scope and Solution Approach:

- ❑ Transportation Domain
- ❑ Agent-Based Optimization
- ❑ Optimization Results

### Business Application:

- ❑ Dispatching Process
- ❑ End User Functionality
- ❑ Business Benefits

## Transportation Domain: Complexity & Dynamics



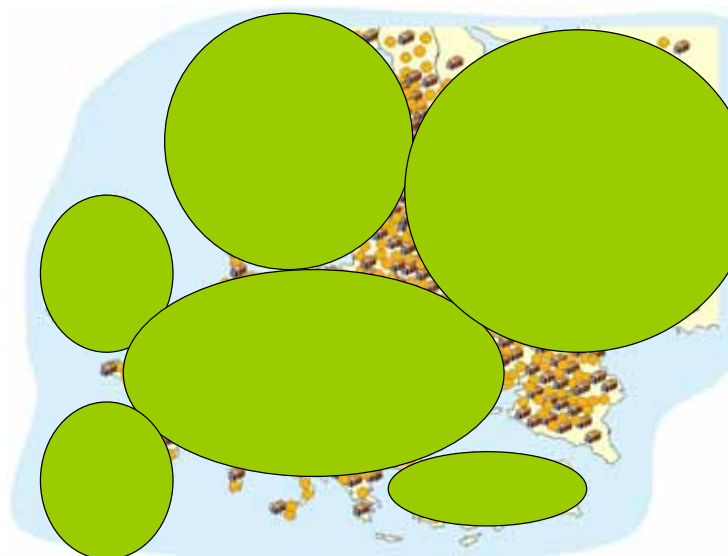
### □ Complexity

- 15.000 trucks per day
- 40.000 orders each day
- 500 users working with the system
- Dozens of Constraints

### □ Dynamics

- Orders arrive at any time
- 1,3 unexpected events per order on average

## Traditional Approach and Problems



### □ Visibility

- Opportunities for order combinations are missed
- Opportunities to use owned trucks are missed

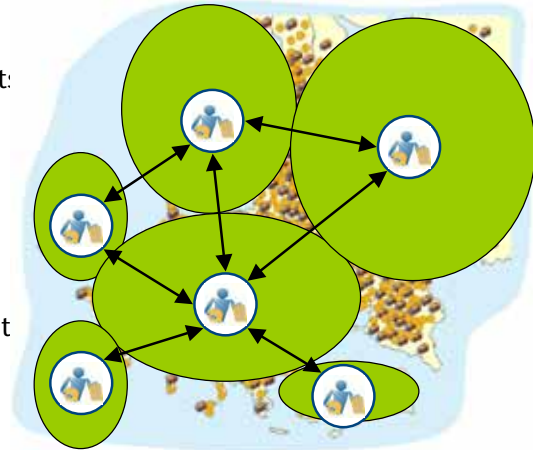
### □ Dynamics

- Rescheduling due to new orders
- Last minute order changes/cancellations
- Truck delays

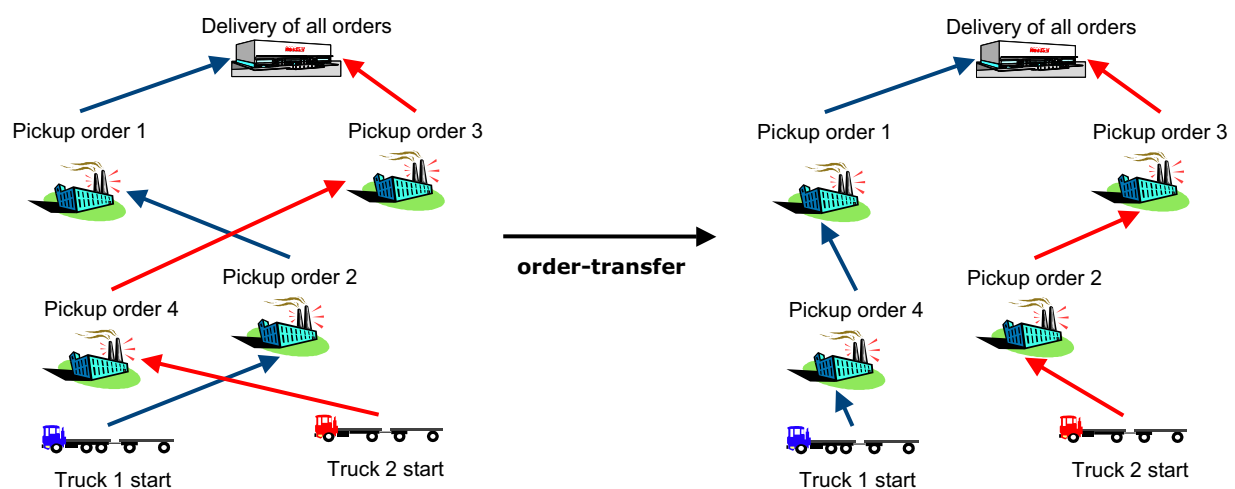


## Agent-based Optimization

- ❑ Dispatchers are supported by agents that ...
  - optimize orders within regions
  - cooperate to identify opportunities between regions
  - inform about real-time events and check consequences
  - inform about expected real-time event: that did not occur
- ❑ Agents do this by ...
  - following a bottom-up principle with decentralized solution finding and escalation strategies
  - optimising based on a continuous cost calculation (economic model)

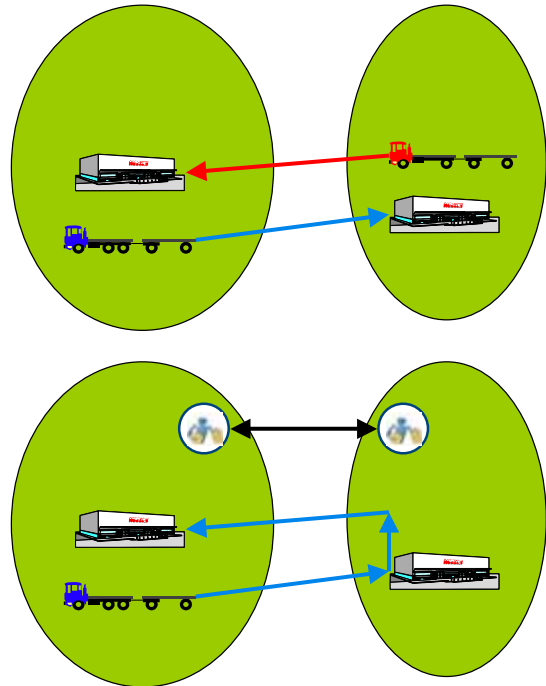


## Agent-Based Optimization



## Agent-based Optimization

- ☐ Without agents
  - Regions are separated
  - Opportunity for a return trip is missed
  - Opportunities for order combinations are missed
- ☐ With agents
  - Agents communicate across regions to identify cost saving opportunities

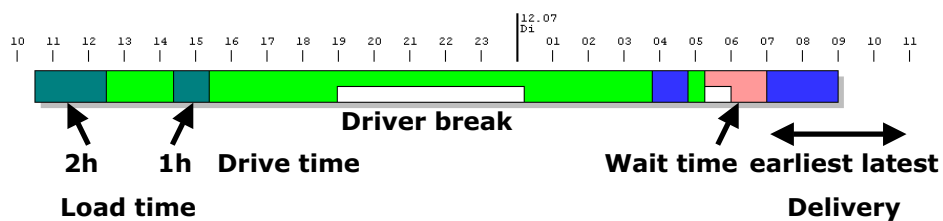


## Transportation Domain: Load Constraints

- ☐ Precedence (pickup before delivery)
- ☐ Pairing (pickup and delivery by the same truck)
- ☐ LIFO (last in first out loading of orders)
- ☐ Capacity limitation (dependent on truck type)
- ☐ Weight limitation (dependent on truck type)
- ☐ Order – truck compatibility (Type, Equipment)
- ☐ Order – order compatibility (Dangerous goods)

## Transportation Domain: Time Constraints

- ☐ Order dependent load and unload times
- ☐ Earliest and latest pickup (Soft constraints)
- ☐ Earliest and latest delivery (Soft constraints)
- ☐ Opening hours for pickup and delivery
- ☐ Legal drive time restrictions
- ☐ Maximum Tour duration
- ☐ Lead time for ordering spot market trucks



## Cost Model

- ☐ Subcontracted Capacities
  - Fix and variable costs

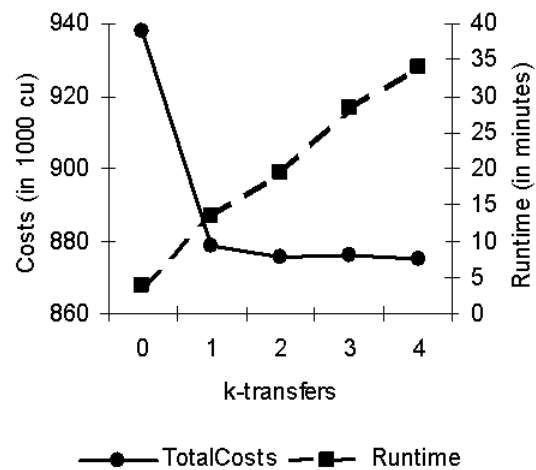
$$c_{Sub} = c_{fix} + d \cdot tariff(Sub)$$

- ☐ Spot Market Capacities
  - Variable costs depending on
    - Relation (Origin – Destination)
    - Distance
    - Load
    - Discount
  - Minimum costs

$$c_{Spot} = d \cdot l_{max} \cdot tariff(relation, d, l_{max}) \cdot discount$$

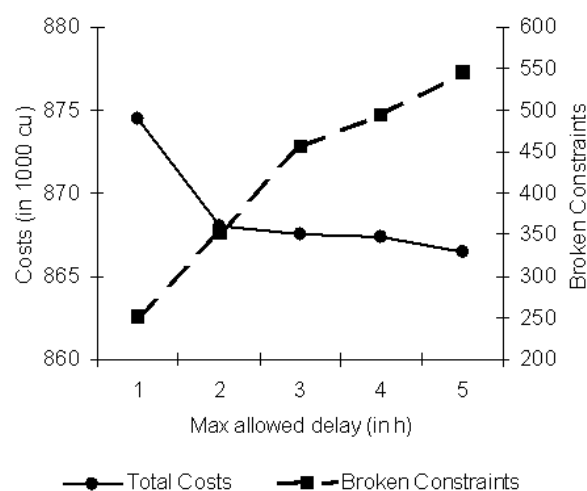
## Results: k-transfers

- Optimization results with increasing k (number of orders exchanged)



## Results: Soft Time Windows

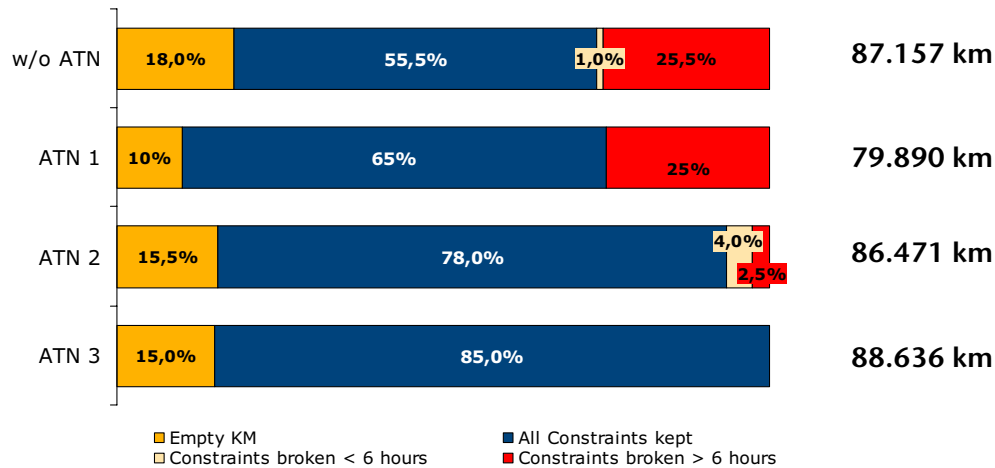
- Optimization results with increased soft time windows



## Results : Higher Service Level at Reduced Costs



- ❑ ATN 1: Significant reduction of driven kilometers at same service level
- ❑ ATN 2: Reduced kilometres/miles with significant higher service level
- ❑ ATN 3: Minimal additional kilometres/miles while meeting all restrictions



## Results: Cost Reduction



- ❑ The solution quality is significantly better

	Savings
Cost	11.7%
Kilometer	4.2%
Vehicles	25.5%

*Savings of agent-based dispatching  
compared to manual dispatching*

## Content

### Problem Scope and Solution Approach:

- ❑ Transportation Domain
- ❑ Agent-Based Optimization
- ❑ Optimization Results

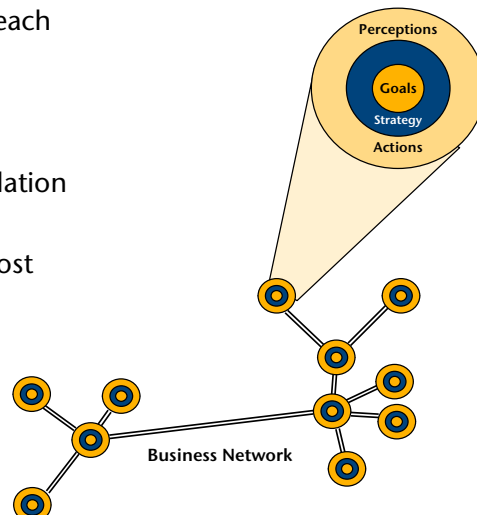
### Business Application:

- ❑ Dispatching Process
- ❑ End User Functionality
- ❑ Business Benefits

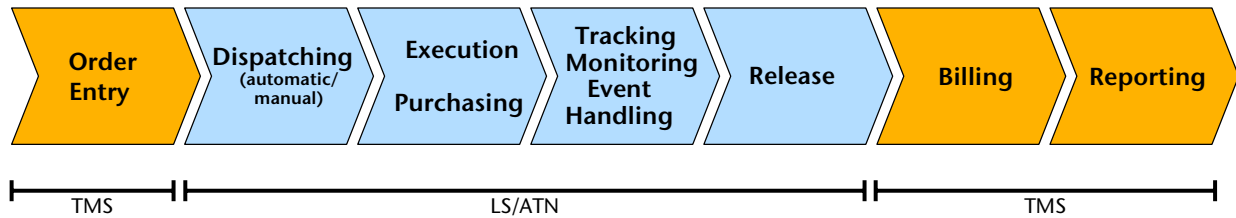
## A Short Look At The Technology Behind

- ❑ Software agents are the answer of research to problems of high dynamics and complexity:
  - They are based on a role model with delegated responsibility, very much as each enterprise masters its complexity.
  - They map a business model 1:1.
  - They follow a bottom-up principle with decentralized solution finding and escalation strategies.
  - They optimise based on a continuous cost calculation (economic model).
- ❑ Software agents are perfectly suited for **dynamic resource allocation in real-time.**

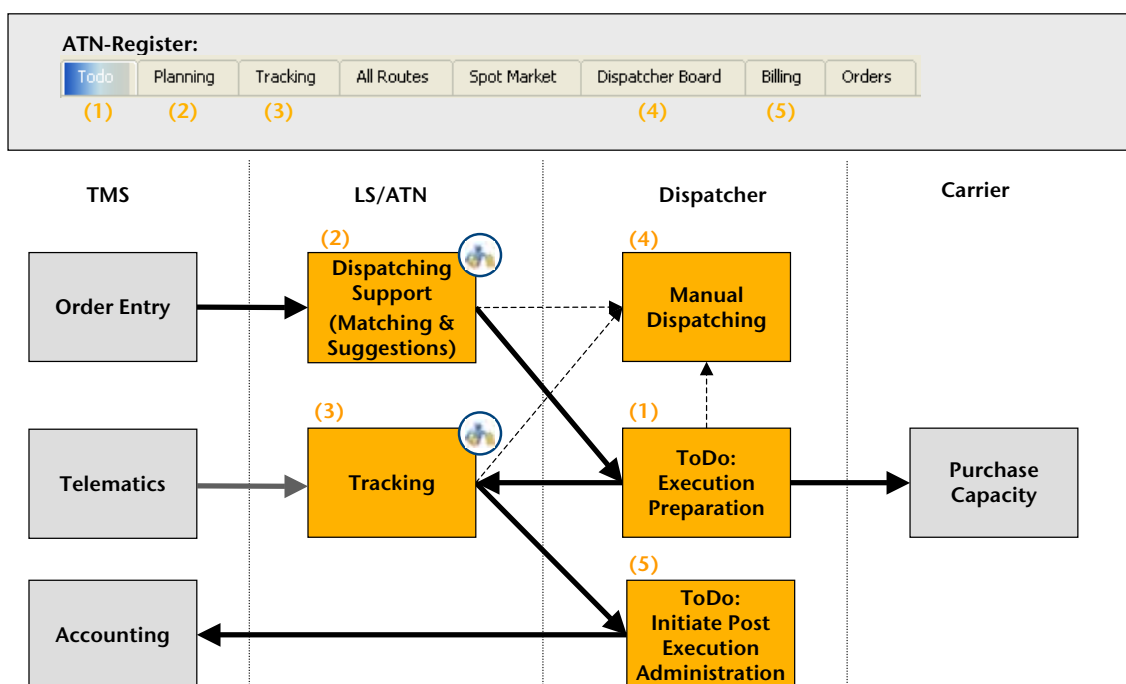
Different terms / One idea:  
 Software Agent  
 Electronic Assistant  
 Role Owner



## LS/ATN – Process Overview



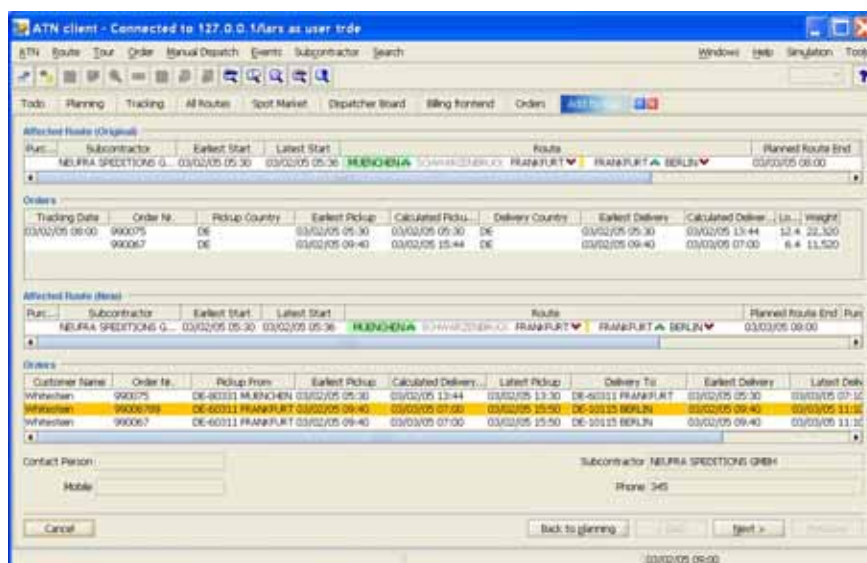
## LS/ATN – Main Dispatching Process



## Automatic Dispatching Support



- ☐ Automatically create a transport plan
- ☐ Suggestions



wt.gor.mtg | v1.0 | 2006-03-09 | CHD, KDO

Copyright © 2006 by Whitestein Technologies GmbH, Germany  
All rights reserved.



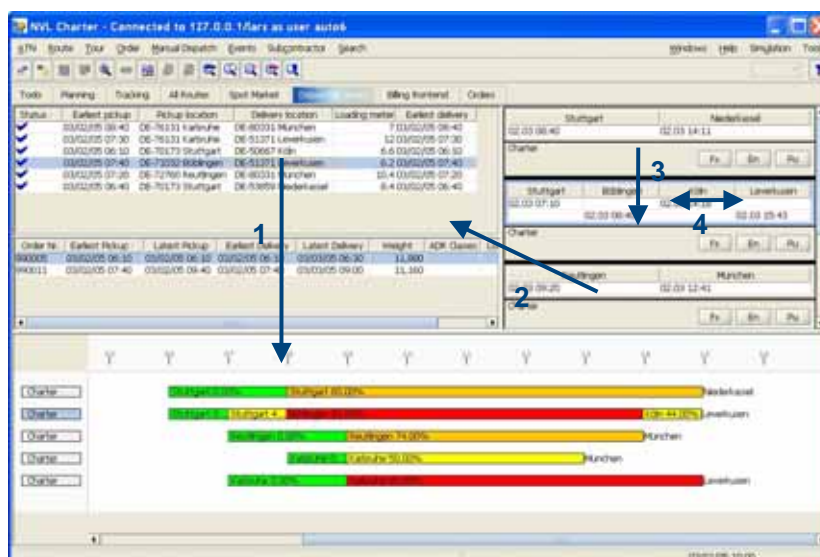
WHITESTEIN  
Technologies

- 21 -

## Overruling by Manual Dispatching



- ❑ Manual Dispatching / Overruling
  1. Add order to truck
  2. Remove
  3. Exchange
- ❑ Node order
  4. Change
- ❑ Schedule



wt.qor.mtg | v1.0 | 2006-03-09 | CHD, KDO

Copyright © 2006 by Whitestein Technologies GmbH, Germany  
All rights reserved.



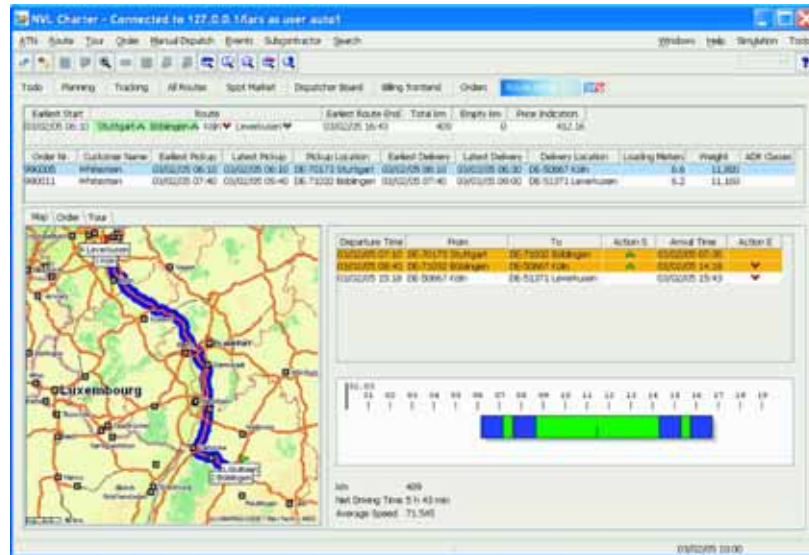
WHITESTEIN  
Technologies

- 22 -



## Tracking & Event Handling in Real Time

- ❑ Tracking feedback by Telematics systems
- ❑ Reactive alerting
- ❑ Proactive alerting



## Business Benefits: Cost Savings

- ❑ Higher utilization of transportation capacity (variable costs)
  - Increased utilisation (chargeable weight) of the transportation units / trucks
  - Reduced driven kilometres/miles and thus less trucks needed
  - This leads to an overall transportation **cost saving of 5% – 10%** (proven by several detailed simulations based on real life data)
- ❑ Lower process cost (fix costs)
  - Automated handling of plan deviations
  - Evaluation of solution options in real-time
  - Reduced communication costs (dispatcher's time and material)
  - Better support for customer service through fast, comprehensive and up-to-date information about order execution
  - Results in **30% – 50% increased efficiency**



## Business Benefits: Additional Advantages



- ❑ Increased quality
  - Managed service level fulfilment
  - Service levels and other boundary conditions are kept, which helps to reduce additional costs (penalty costs)
  - Immediate and reliable dispatching of new orders
  - Faster and better visibility of the impact of new orders (or order changes)
- ❑ Prepared for more business
  - Dispatchers are relieved from their routine tasks
  - More time for customer relationship
  - Process more orders with the same resources
- ❑ Other
  - Cost transparency
  - Seamless integration with TMS and telematics



## Conclusion



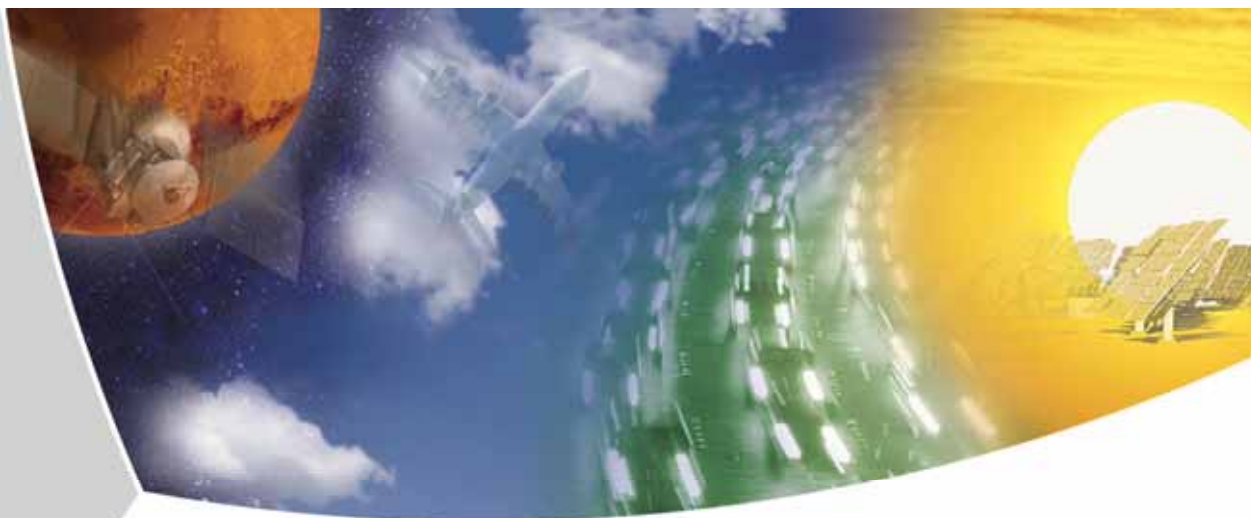
Agents ...

- ❑ ... model the transport logistics domain in a natural way
- ❑ ... achieve considerable cost savings
- ❑ ... ensure a higher service level
- ❑ ... are in daily operation in real world business

# **Verkehrsaktuelle Flottendisposition mit Fahrzeugprobanden als Reisezeitdetektoren**

**Prof. Dr. Reinhart Kühne**

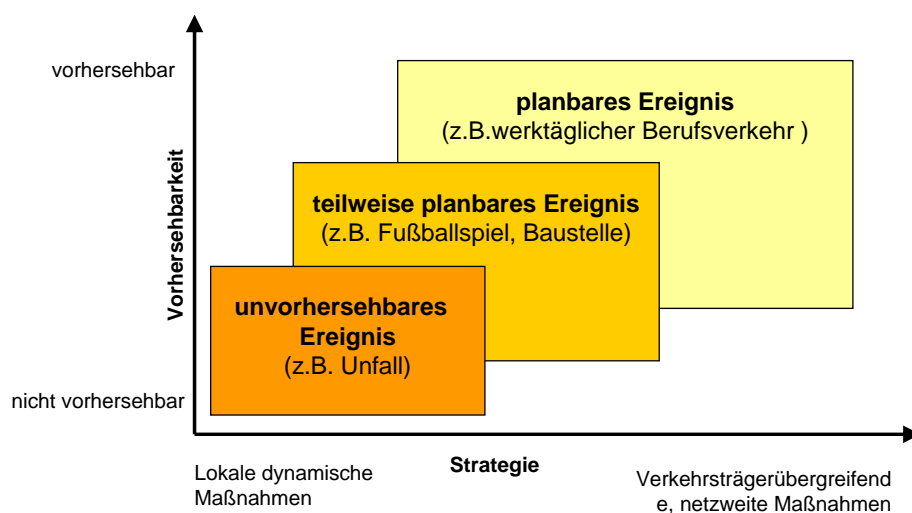
**DLR Berlin**



## Verkehrsaktuelle Flottendisposition mit Fahrzeugprobanden als Reisezeitdetektoren

**Prof. Dr. Reinhart Kühne**  
Verkehrsstudien, Berlin

### Vorhersehbarkeit von Ereignissen und Strategieentwicklung



Unvorhersehbares und verkehrsrelevantes Ereignis (z.B. Unfall) → **Störfallmanagement**

(Teilweise) planbares Ereignis wie Baustelle oder Fußballspiel → **Ereignismanagement**

Normaltägliche Verkehrssituation (Stau am Pragsattel) → **abgestimmte Dauermaßnahmen**

## IT-gestützte Verkehrserhebungen

### Verkehrssensoren

#### Punktuelle Sensoren:

- Induktionsschleifen
- Infrarotsensoren
- Video

#### Parameter:

- Geschwindigkeit (lokal)
- **Verkehrsmengen**
- Fz-Klassifikation (z.T.)

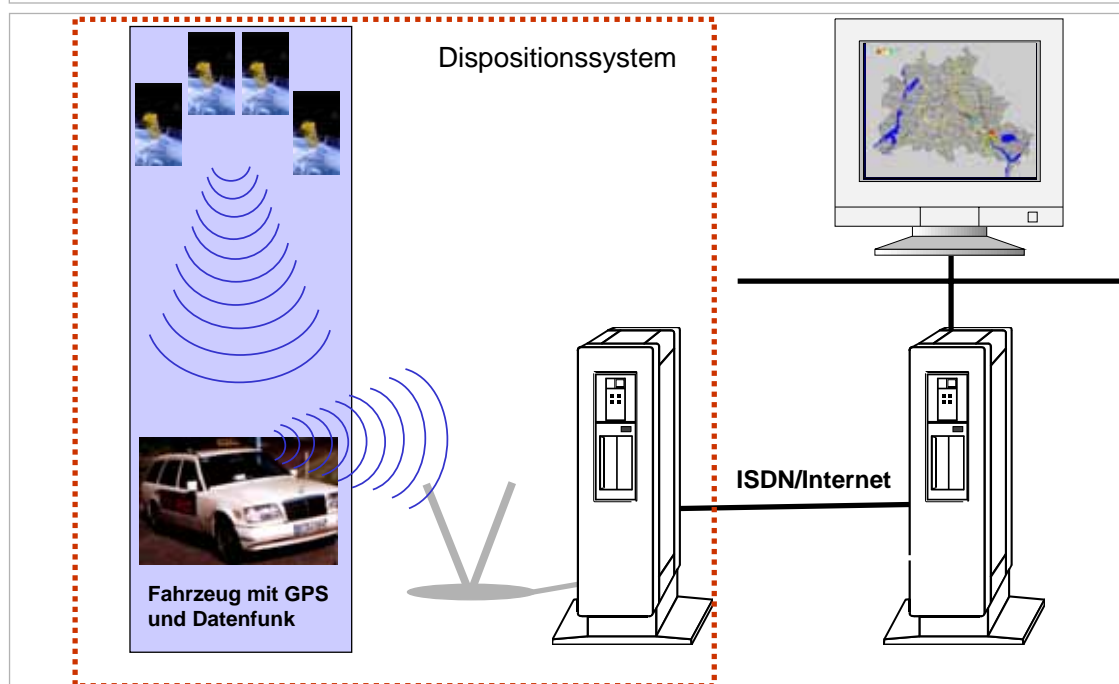
#### Floating-Car-Daten:

- Aktiv FCD(GPS, cell-basiert GSM)
- Passiv FCD (e.g. Transponder)

#### Parameter:

- Geschwindigkeit (Kont./Durchschnitt)
- **Reisezeiten**
- **Routeninformation**

### Synergien aus der GPS gestützten Flottendisposition



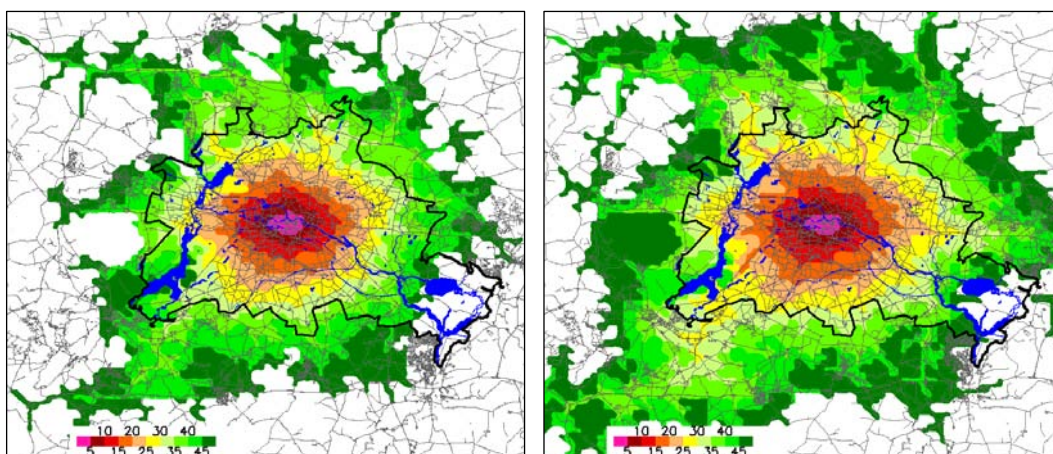
## Datenanalyseverfahren der Taxi-FCD

- ▶ **Map-Matching und Routing**
  - Projektion der Trajektorien auf das Straßennetz
  - Ermittlung der gefahrenen Routen und Geschwindigkeiten
- ▶ **Ergänzung um historische FCD**  
Ergänzung historischer FCD (gleicher Wochentag, gleiche Stunde)
- ▶ **Ergänzung um Annahmen**  
Typischer Tagesgang je nach Straßenkategorie, etc.



Stuttgarter Innenstadt, Di., 1.7.2003, 17 – 18 Uhr

## Accessibility Analysis



Isochrones of road travel time in minutes to (left) and from (right) the Brandenburg Gate, Berlin, on a typical Monday, 8 a.m.

- noncircular shape of the isochrones indicate asymmetries of road net quality
- longer travel times towards the city center





### Aktuelle Verkehrslage: Fahrzeiten auf wichtigen Routen

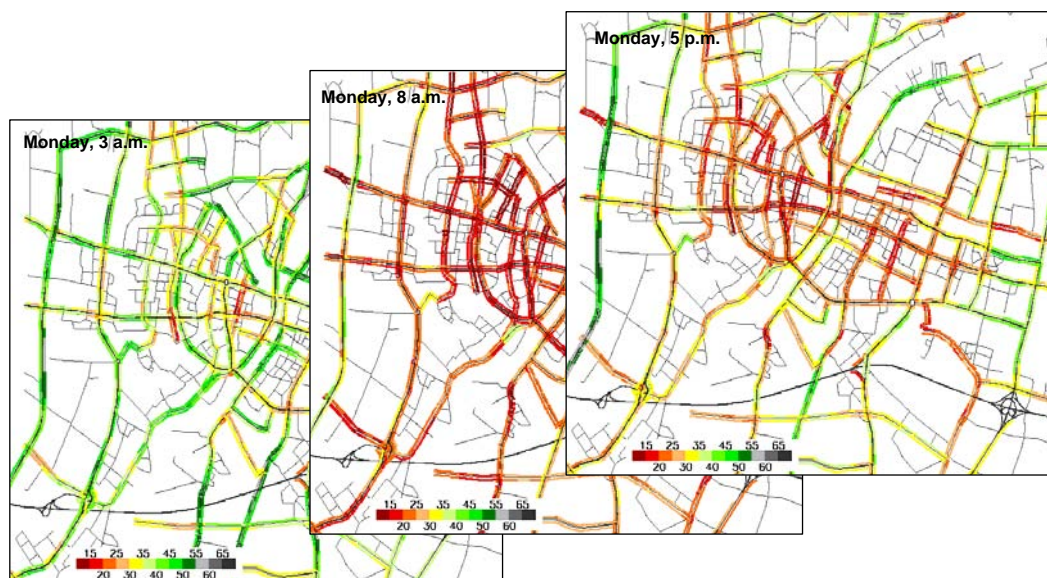
Die Tabelle zeigt die aktuell zu erwartenden Fahrzeiten auf einigen vordefinierten Routen. Der Routenverlauf und die Abdeckung durch aktuelle Daten sind aus den Grafiken in der letzten Spalte ersichtlich.

[Erklärung zur Tabelle](#)

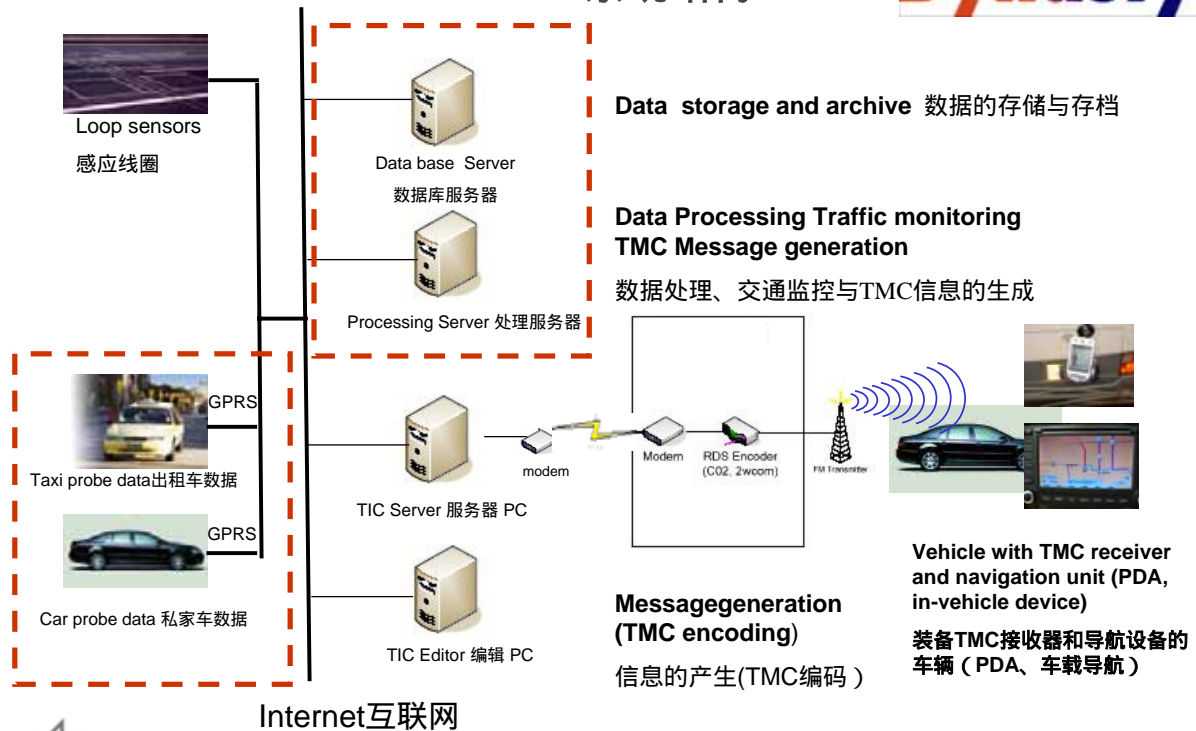
Letzte Aktualisierung: 08.03.2006 09:53 Uhr

Nummer	Route	letzte Daten	aktuelle Fahrzeiten	Abweichung zur normalen Fahrzeit	Grafik
1	<b>Westefahrt</b> von Westautobahn bis Karlsplatz	09:52 Uhr	22:00 min	- 4:45 min	
	Gegenrichtung	09:52 Uhr	18:00 min	- 1:45 min	
2	<b>Gürtel</b> von Abfahrt A23 bis Eichenstraße	09:52 Uhr	6:00 min	- 1:15 min	
	Gegenrichtung	09:52 Uhr	7:15 min	- 1:15 min	
3	<b>Donaukanal und A4 - Flughafenautobahn</b> von Urania bis Flughafen	09:51 Uhr	14:45 min	- 0:45 min	
	Gegenrichtung	09:52 Uhr	17:15 min	- 1:45 min	
4	<b>Donaukanal</b> von Friedensbrücke bis Abfahrt Nordbrücke - Brünner Straße	09:52 Uhr	6:00 min	- 0:45 min	
	Gegenrichtung	09:52 Uhr	7:00 min	- 1:15 min	
5	<b>Wagramer Straße und Lasallestraße</b> von Rautenweg bis Praterstern	09:52 Uhr	15:15 min	- 0:45 min	
	Gegenrichtung	09:46 Uhr	16:00 min	+ 0:45 min	
6	<b>Brünner Straße</b> von Stammersdorfer Straße bis Auffahrt Nordbrücke	09:51 Uhr	9:45 min	0:00 min	
	Gegenrichtung	09:51 Uhr	8:30 min	+ 1:15 min	
7	<b>Triester Straße</b> von Matzleinsdorfer Platz bis Sterngasse	09:52 Uhr	6:00 min	- 0:30 min	
	Gegenrichtung	09:53 Uhr	13:00 min	+ 3:00 min	

## Downtown link travel speeds on a typical Monday during several times of the day for Ningbo Center



## The DYNASTY Architecture 系统结构



## The DYNASTY Data Capturing and Processing System DYNASTY 数据采集与处理系统

- Use of Taxi GPS data  
利用出租车的GPS数据
- 2400 probe vehicle  
2400辆试验车辆
- Frequently transmitted GPS data  
频繁地传送GPS数据
- Traffic Monitoring based on the GPS data  
基于GPS数据上的交通监控
- Jam extraction and TMC message generation  
识别塞车以及生成TMC信息
- Real-time operation test  
实时的运行实验





## Dynamische Off-board Navigation

- **Dynamische Navigation auf Basis von Echtzeit-FCD**
- **Versionen für verschiedene mobile Engeräte (PDA Compaq iPaq, O2 XDA etc.)**
- **light version (34KB!) für Java Phones**
- **GPRS Kommunikation**
- **Standard GPS-Empfänger**
- **Optische + verbale Zielführung**
- **optional: Kartendarstellung**

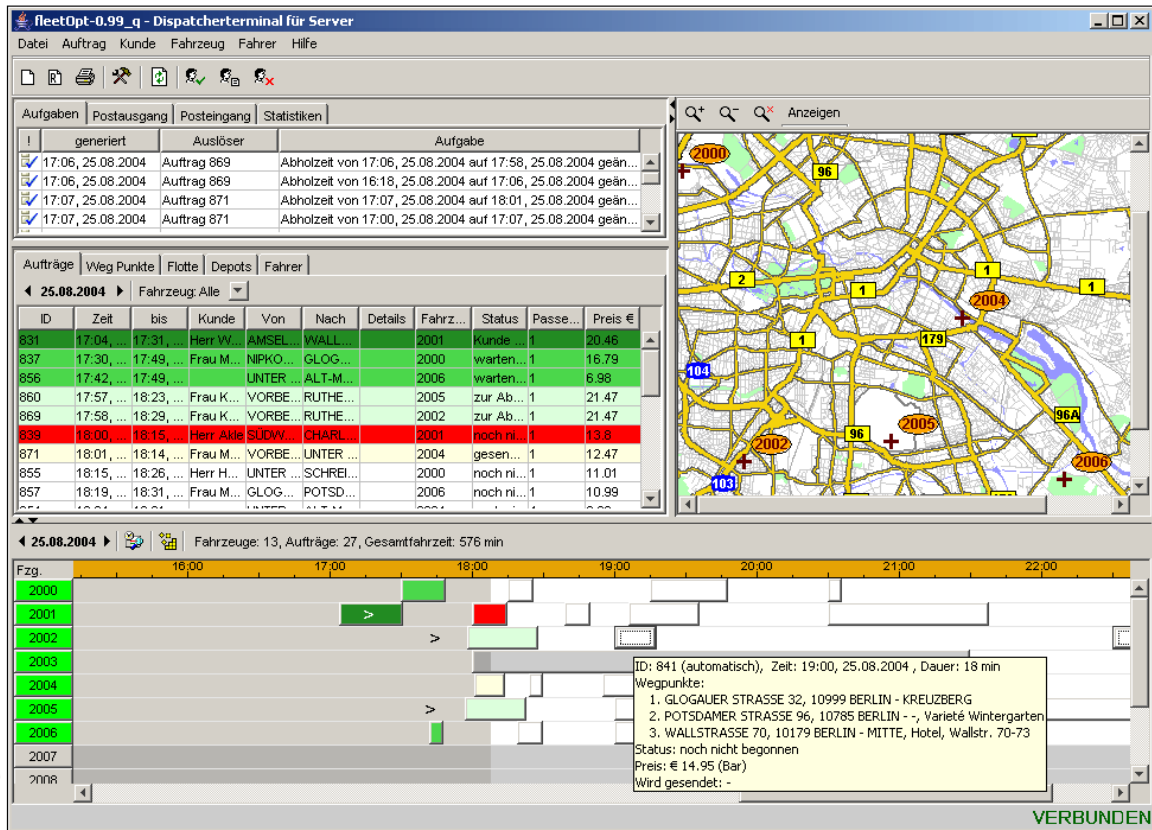


## Innovationslinien in Güterverkehr und Logistik

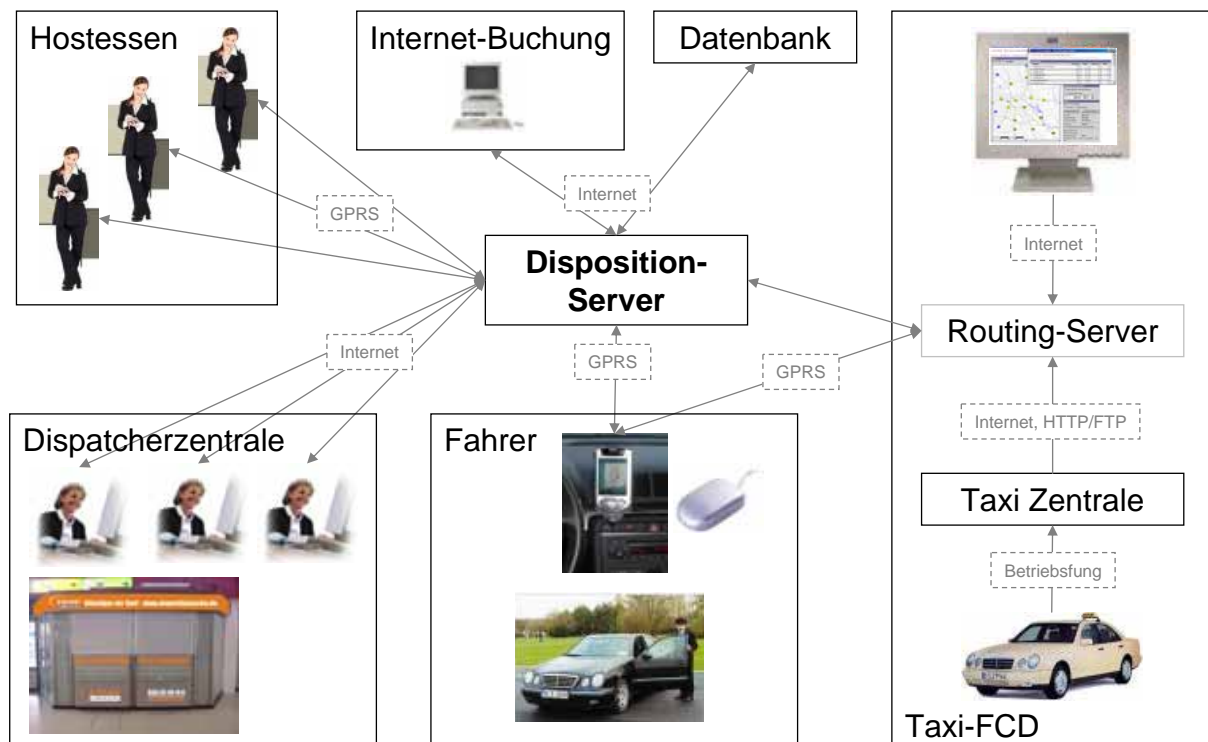
Straße, Schiene Spedition, Logistik verladende Wirtschaft	Neue Techniken und Verfahren von Transport-, Liefer-, Lager- und Umschlagsdiensten regional und national	Flottenmanagement mit Satellitenortung und Mobilkommunikation, Automatisierungs- und Dispositionssystemen, Unterwegs-Überwachung von Fahrzeugen und Sicherheitskomponenten ( WEB-EDI, Online-Systeme und -Netzwerke)
Spedition, Verladende Wirtschaft	Anwendungen von neuen Technologien	Internationale Vereinheitlichung von: Liefer- und Sendungsdaten, Transport- und Abrechnungsdaten im elektronischen Datenverkehr  Automatisierte Disposition von Sendungen und Transportmitteln; automatisierte Sendungs-, und Lieferdatenverfolgung und Abrechnungsprozeduren.  Weiterentwicklung der City Logistik

## FleetOptimizer - das Dispatcherterminal

➤ ausführliche Beschreibung unter <http://www.cityrouter.com/doc>



## Dynamische Flottendisposition mit FleetOptimizer



## Branchenauswahlkriterien für den Einsatz verkehrsaktueller Routenplanung

- Die Dienstleistung wird mit dem Einsatz von Fahrzeugen durchgeführt.
- Die Fahrzeugflotte des Unternehmens bewegt sich überwiegend im Stadtgebiet und muss immer schnellstmöglich zum jeweiligen Kunden gelangen.
- Die Fahrzeugflotte besteht aus einer bestimmten Fahrzeuganzahl, deren Einsatz koordiniert werden muss, d. h. es wird eine Routenplanung vorgenommen.
- Die Kunden erwarten die Dienstleistung in einem festgelegten Zeitrahmen.
- Die Dienstleistungstätigkeit ist durch den Fahrzeugeinsatz vom Straßenverkehr abhängig.

## Branchen, die eine dynamische Routenplanung befürworten (Auszug aus einer Marktanalyse 2004)

Branche	Unternehmen	Kriterien					Anzahl der zutreffenden Kriterien
		a) Flottengröße (mehr als 50 Fahrzeuge)	b) Einsatzzeiten (mehr als die Hälfte der Zeit)	c) Einsatz auf dem größten Teil des Stadtgebietes	d) regionales Einsatzgebiet	e) wechselnder Kundenstamm	
Chauffeurdienst	Minex	-	+	+	+	-	3
	Markovic	-	+	+	+	-	3
	Anonym	-	+	+	-	-	2
Entsorgung	BSR	-	+	+	+	-	3
	ALBA	-	+	+	+	-	3
Spedition	GTI	+	+	+	-	-	3
	Iwanter	+	+	+	-	-	3
	IHG	+	+	+	-	-	3
	RieckLogistik	+	+	+	-	-	3
ambulante Pflegedienste	Mediavita	-	+	-	+	-	2
	Just&Wäsch	-	+	-	+	-	2
	AHG	-	+	-	+	-	2
Autovermietung	allround	+	+	+	+	-	4
	Hertz	+	+	+	-	-	3
	Europcar	+	+	+	-	-	3
Erläuterung: - stimmt nicht zu + stimmt zu							

# **Evolutionäre Algorithmen für die Planung der Postzustellung**

**Christian Schmidt**

**Locom Consulting GmbH  
Karlsruhe**

# Evolutionäre Algorithmen für die Planung der Postzustellung

AG Logistik und Verkehr

9. und 10. März 2006 in Bonn

Christian Schmidt, Andreas Gabriel



LOCOM Consulting GmbH,  
LOCOM Software GmbH,  
Stumpfstr. 1, D-76131 Karlsruhe  
Tel: +49 721/96 51 - 100  
Fax: +49 721/96 51 - 149

## AGENDA



1. Vorstellung
2. Problemstellung
3. Algorithmus
4. Dynamisierung
5. Zusammenfassung

## LOCOM Consulting GmbH und LOCOM Software GmbH



### Die LOCOM Consulting GmbH

- gegründet in 1988
- Gründung LOCOM Software 1999
- ca. 35 Mitarbeiter
- Firmenstandort Karlsruhe
- Fokus Logistik Consulting:
  - Supply Chain Strategie
  - Industrie- und Handelsunternehmen
  - Consulting- und ingenieurwiss. Methoden
- Softwareentwicklung für die Logistik
  - Planungswerkzeuge
  - Transportmanagement
- Partnerschaftliche Organisation
- Beteiligungsunternehmen der PTV-Gruppe

3

## Problemstellung

Liberalisierung erfordert Flexibilisierung



### Stand der Liberalisierung des europäischen Postmarktes für ausgewählte Staaten

	innländischer Briefverkehr			Werbung		sonstiges, z.B. Zeitungen, Zeitschriften
	< 50g	50g - 100g	>100g	adressiert	unadressiert	
Österreich	●	●	●	>100g	●	●
Belgien	●	●	●	>50g	●	●
Tschechien	●	●	●	●	●	●
Dänemark	●	●	●	>50g	●	●
Frankreich	●	●	●	>100g	●	●
Deutschland	31.12.07	●	●	>50g	●	●
Italien	●	●	●	●	●	●
Niederlande	31.12.07	●	●	●	●	●
Polen	●	●	●	>50g	●	●
Spanien	●	●	●	●	●	●

- Saisonale und wöchentliche Schwankungen

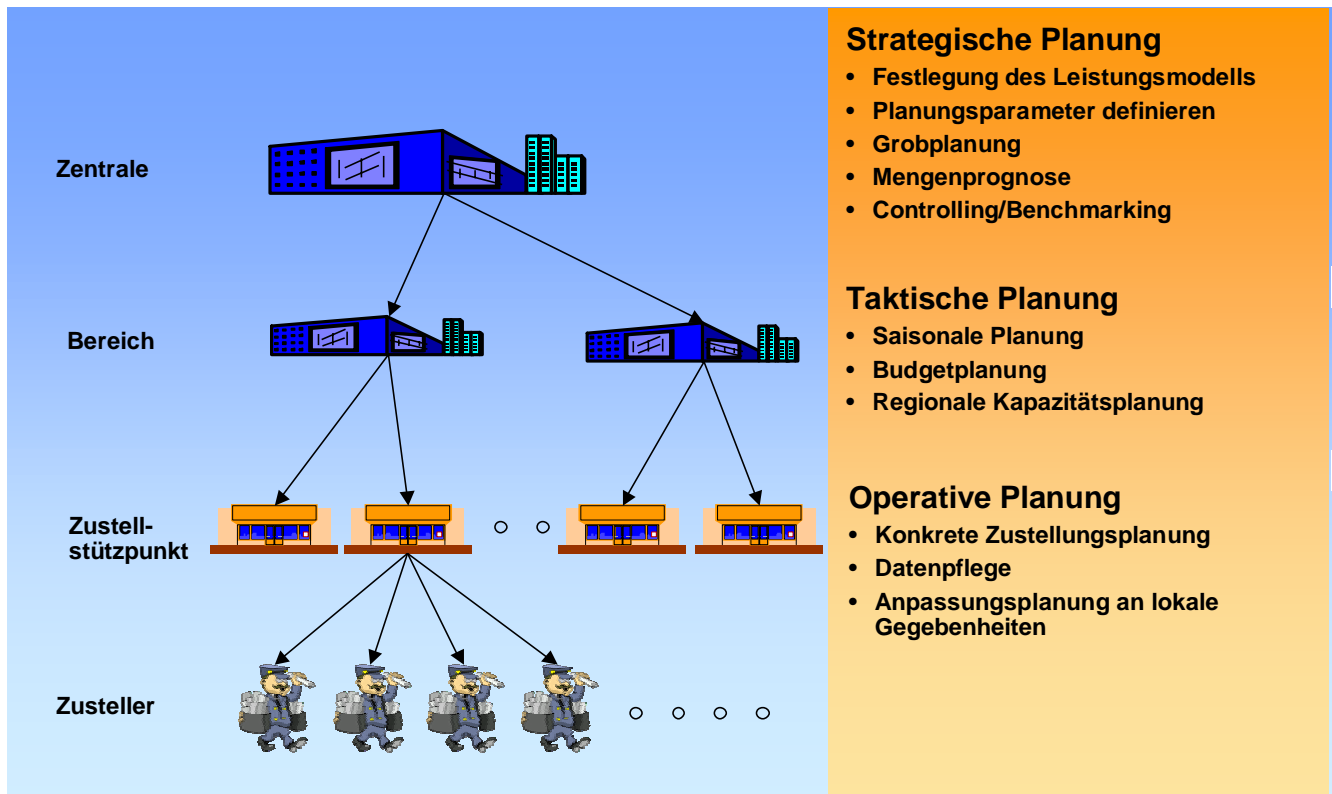
- Zunahme der Werbepost
- Abnahme der hochwertigen Post

**Flexibilisierung, Anpassungsfähigkeit**

4

## Planungsprozess

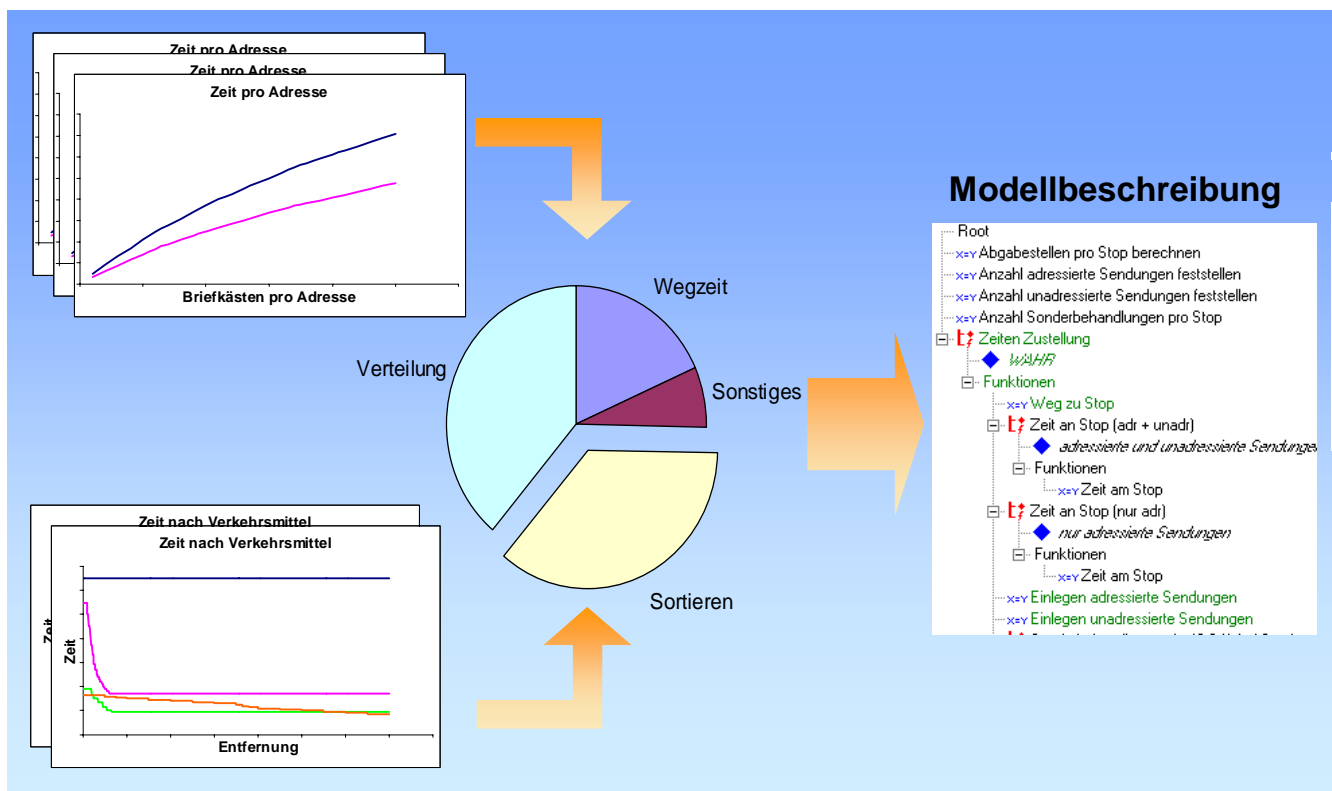
Ablauf



5

## Leistungsmodell

Im Leistungsmodell wird der zeitliche Aufwand modelliert



6



## Berechnungsschritte



Die Bewertung im Modell beginnt mit den Straßenabschnitten. Danach werden die Mengeninformationen auf die Zustellerebene aufaggregiert und die Touren der Zusteller bewertet. Es folgt die Aggregation auf Zustellstützpunkte und deren Bewertung.

### Zustellstützpunkt

- Zugang
- Vorsortierung
- Verteilung
- Overhead



### Zusteller

- Gangfolgesortierung adressierter Sendungen
- Fixzeiten je Zusteller
- Abrechnung eingeschriebener Sendungen, Nachsendungen/Rücksendungen
- Depotstelle: Entnahme der Sendungen
- Pausen



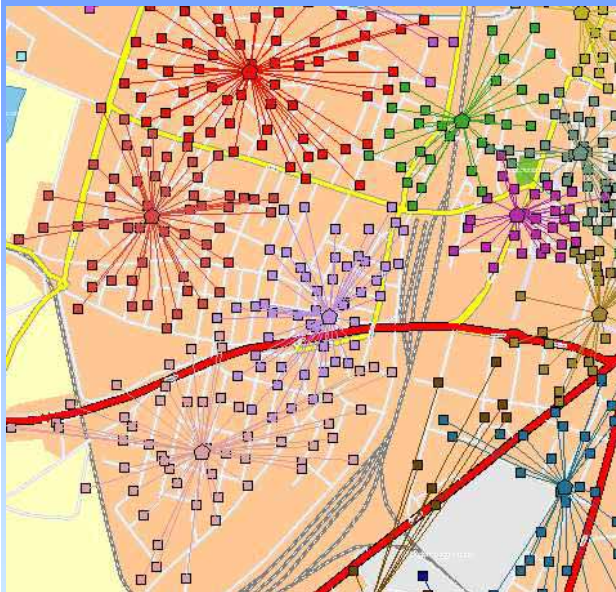
### Straßenabschnitte

- Fussweg
- Fixzeit je Adresse
- Einlegen der Sendungen
- Zustellen der eingeschriebenen Sendungen

7

## Vorgehensweise

Durchführung einer Gebietsplanung



### Gemeinsamkeiten

#### Gebietsplanung

- Stopps
- Umschlagspunkt
- Sendungsmenge
- Frachtmatrix
- Hauptlauf

#### Postzustellung

- Zu Straßenabschnitten aufaggregierte Adressen
- Virtueller Mittelpunkt des Zustellungsgebiets
- Zeit für Straßenabschnitt
- Leistungsmodell
- Hin- und Rückweg

### Unterschiede

#### Gebietsplanung

- Kompakte Gebiete
- mehrere Touren pro Gebiet

#### Postzustellung

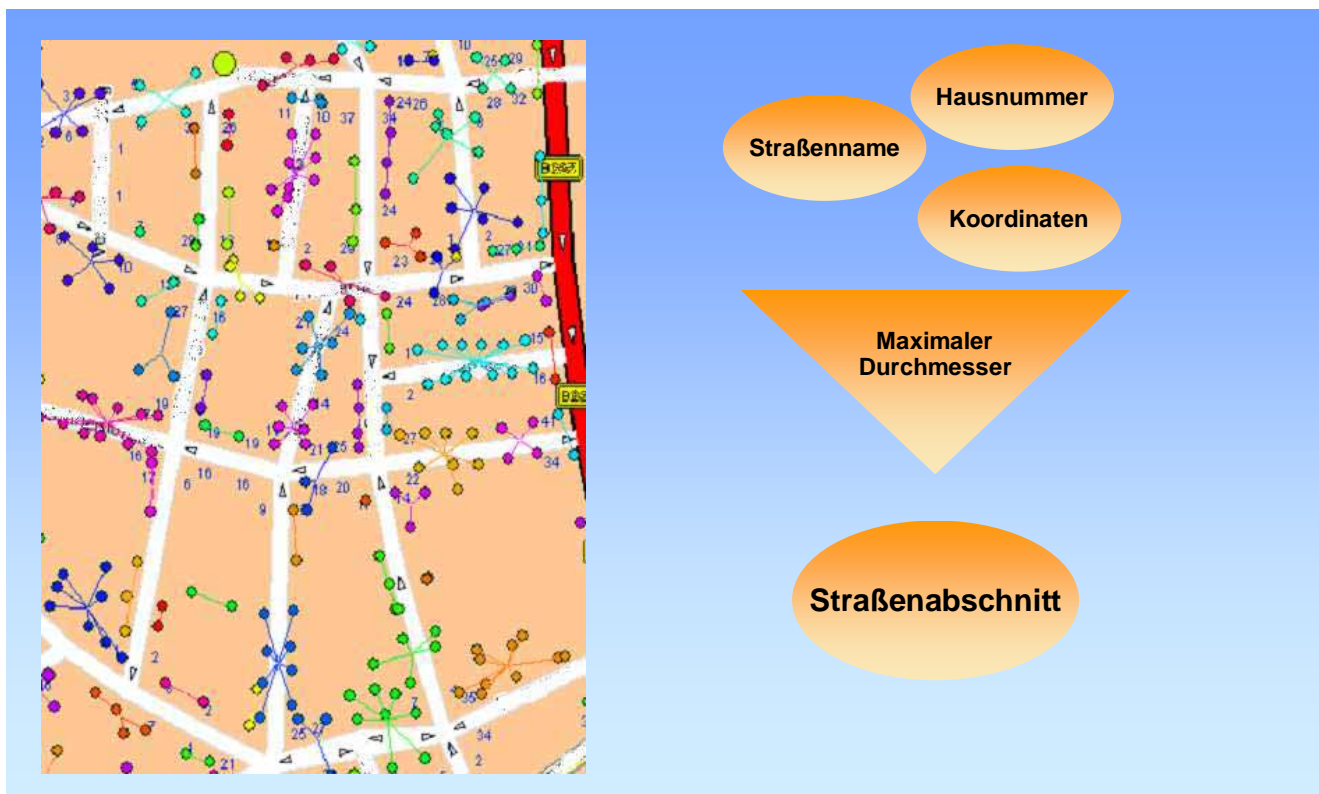
- Gleich große Gebiete
- Eine Tour pro Gebiet

8



## Aggregation

Zusammenfassung der Adressen zu Straßenabschnitten



9

## AGENDA

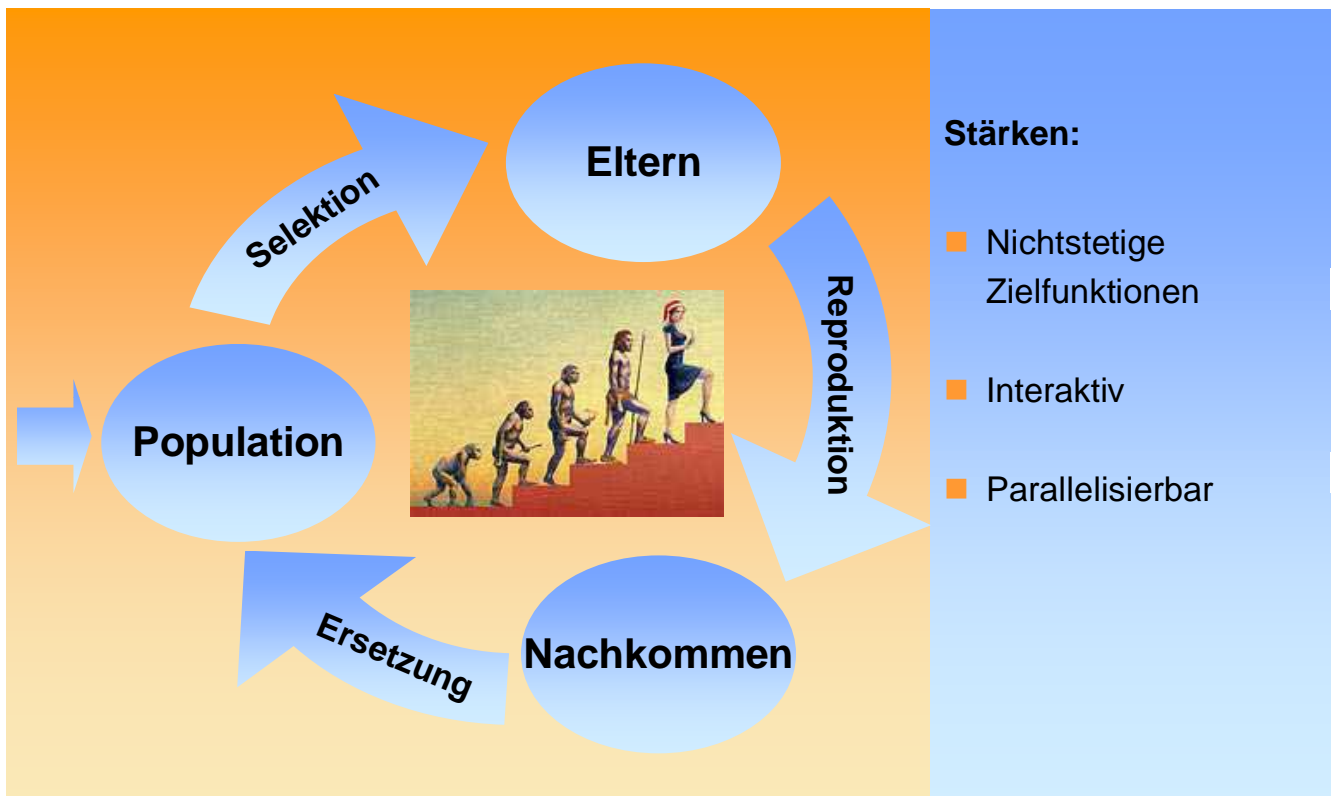


1. Vorstellung
2. Problemstellung
3. Algorithmus
4. Dynamisierung
5. Zusammenfassung

10

## Evolutionäre Algorithmen

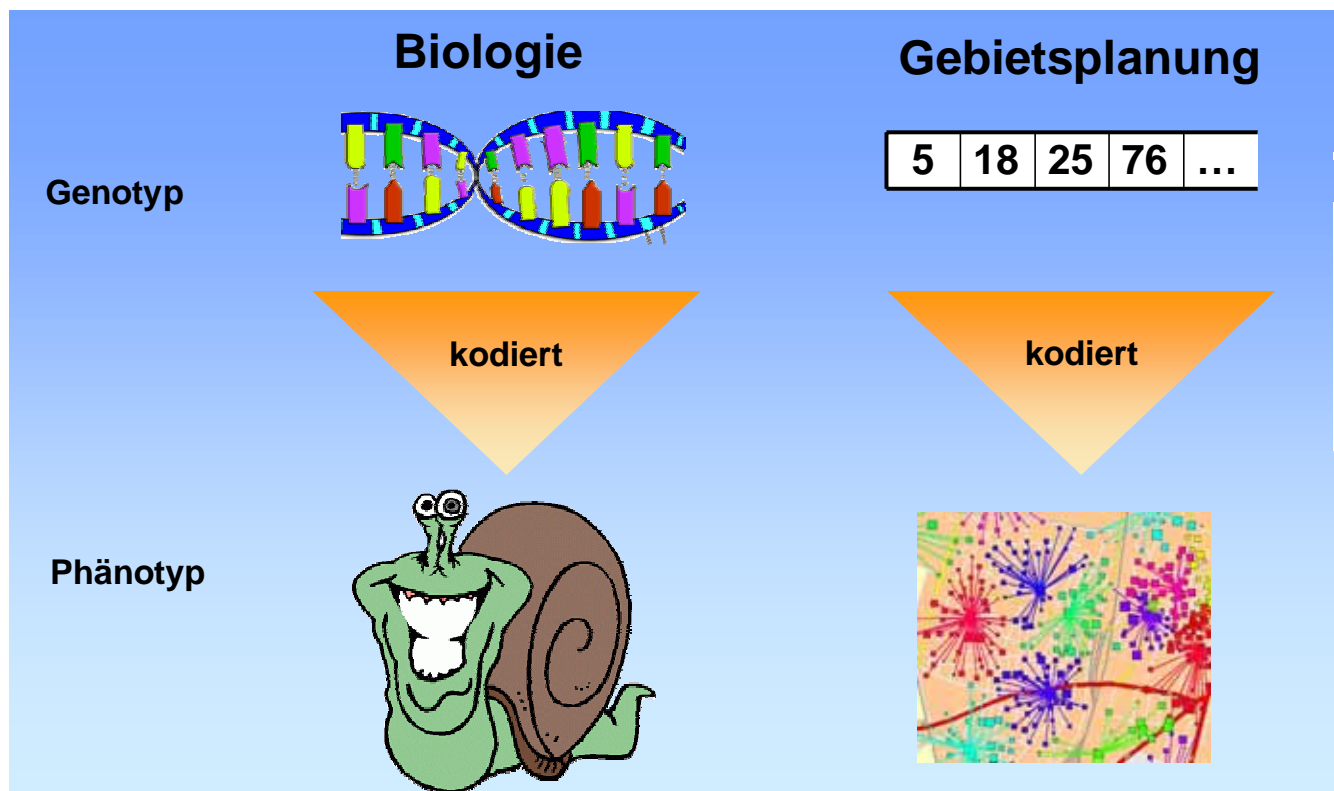
Ein durch die Natur inspiriertes Optimierungsverfahren



11

## Implementierung

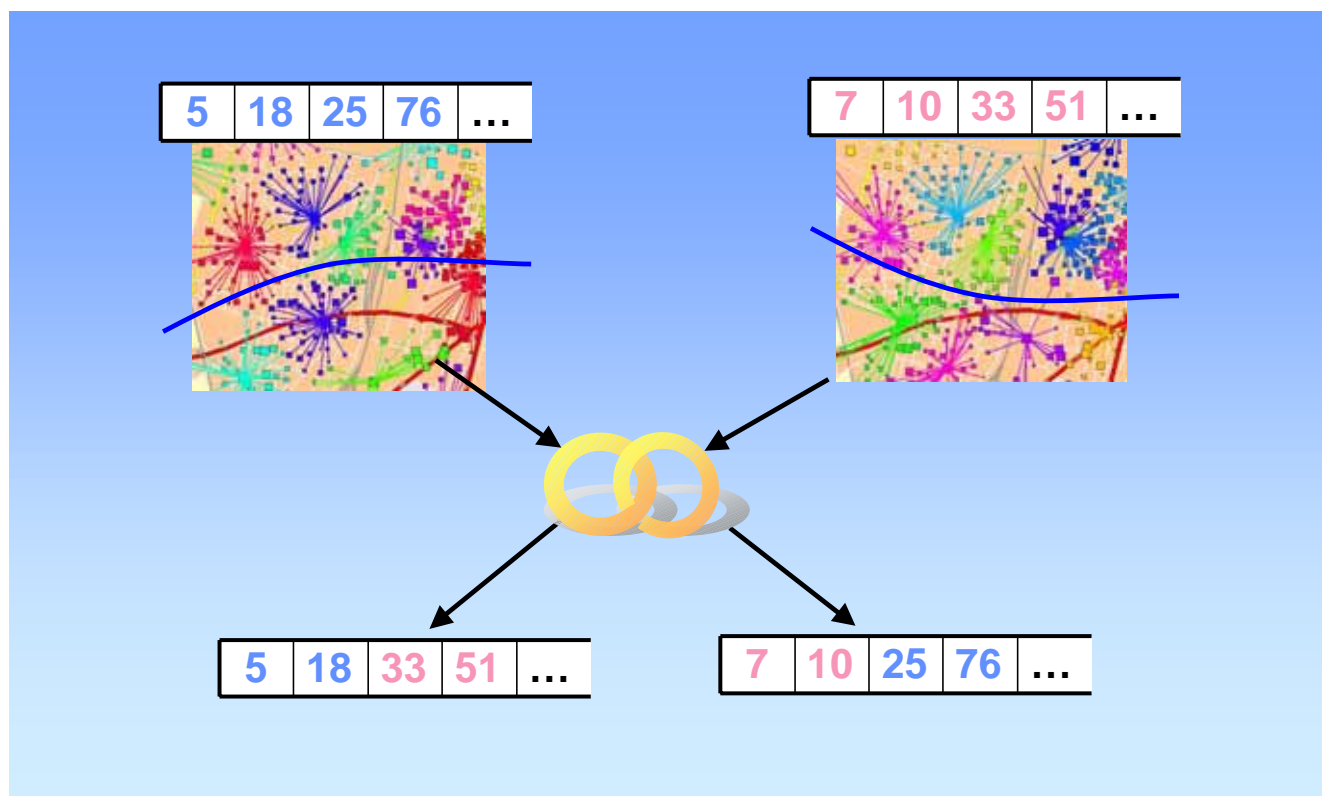
Wahl der Repräsentation



12

## Evolutionäre Algorithmen

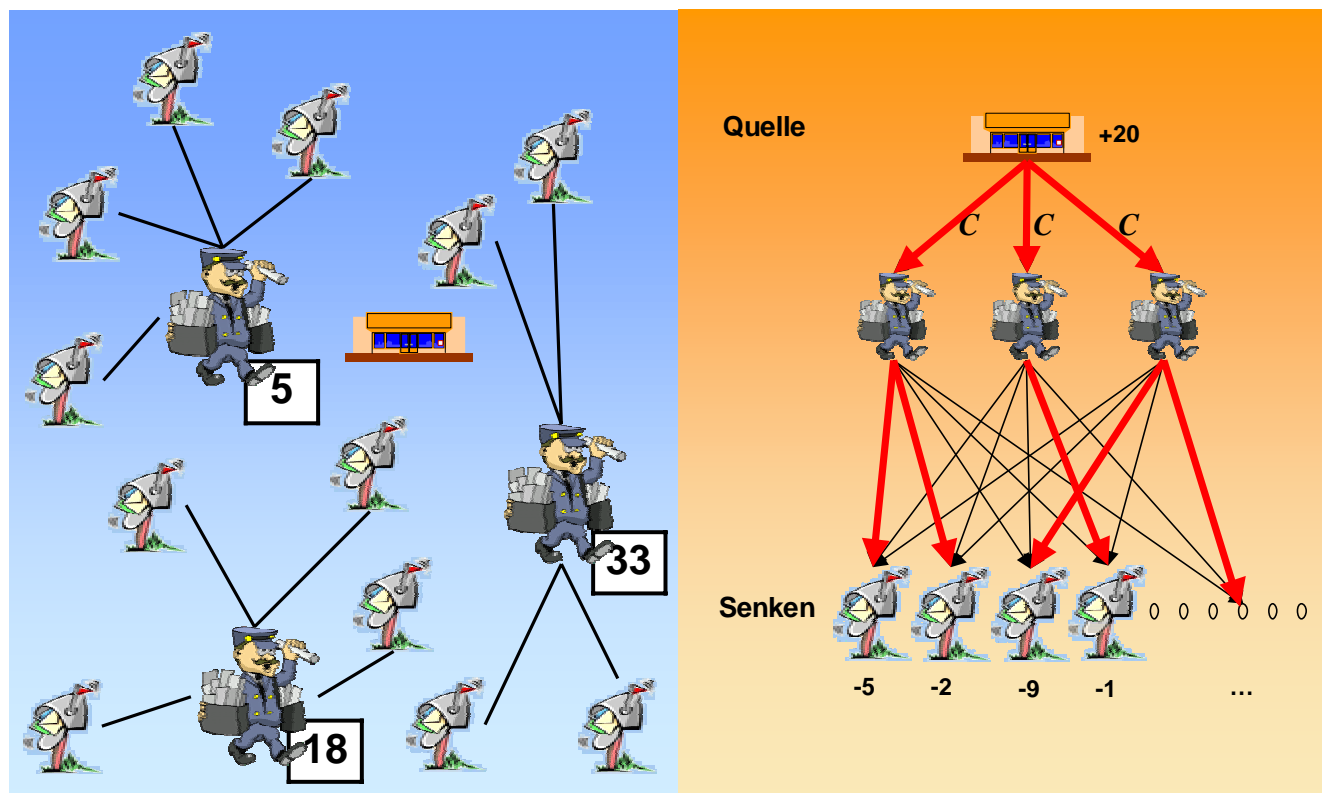
Durch Crossover und Mutation entstehen neue Individuen



13

## Zuordnung

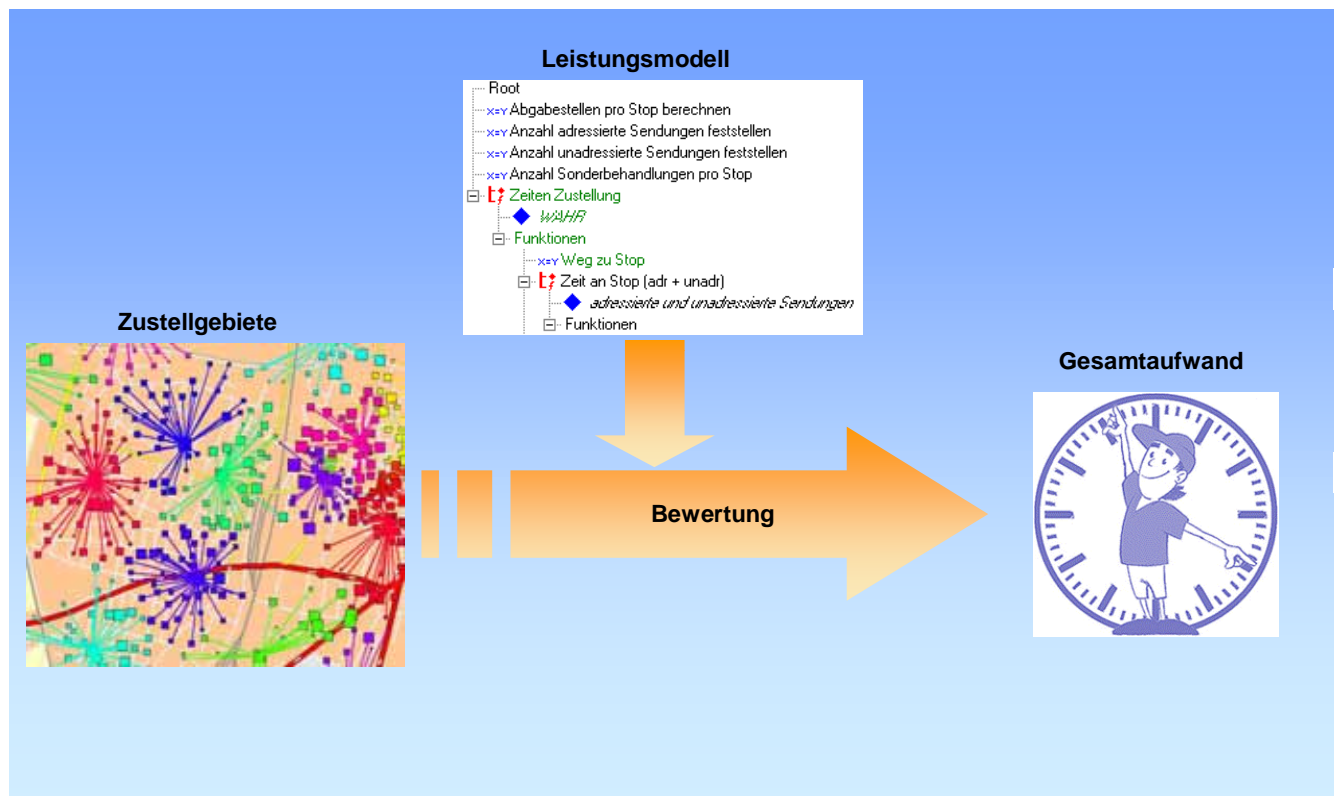
Straßenabschnitte werden den Zustellern durch Netzwerkfluss zugeordnet



14

## Bewertung

Mit dem Leistungsmodell wird die Qualität einer Lösung bestimmt



15

## AGENDA



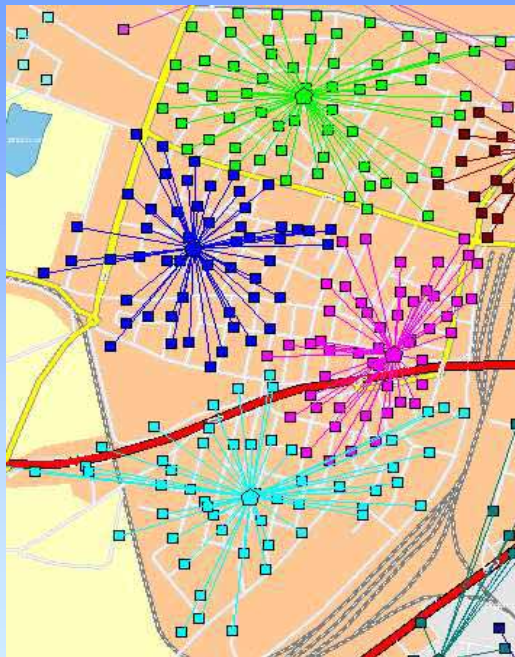
1. Vorstellung
2. Problemstellung
3. Algorithmus
4. Dynamisierung
5. Zusammenfassung

16



## Dynamisierung

Zusammenfassung von Gebieten



### Bei reduziertem Volumen:

- Reduktion der Anzahl Zustellgebiete
- Vergrößerung der Zustellgebiete
- Gleiche Auslastung

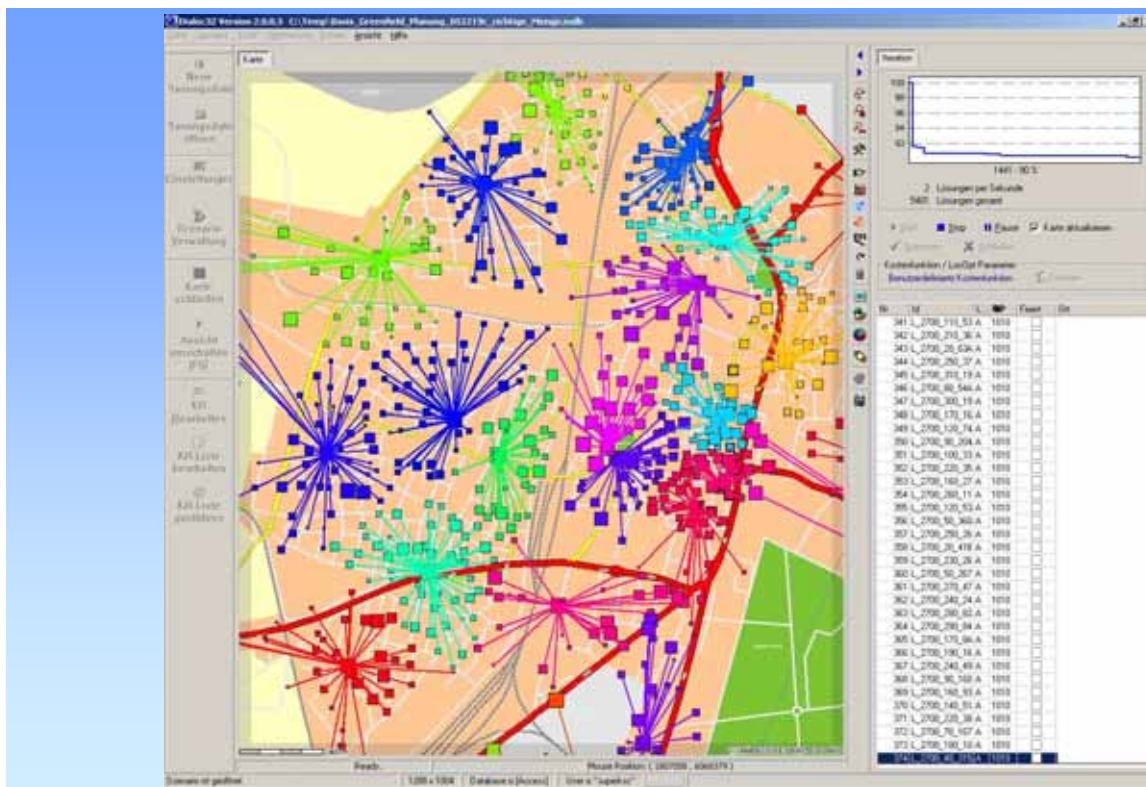
### Verfahren:

- Erneute Gebietsplanung
- Mögliche Gebietsmitten beschränkt auf Gebietsmitten bei Vollast
- Selbes Leistungsmodell

17

## DIALOG

Durchführung einer Gebietsplanung



18

## Zusammenfassung & Ausblick



### Zusammenfassung

- Durchgängiges Planungsverfahren
- Top-Down & Bottom-Up
- Verfahren erzielt gute Ergebnisse
- Im praktischen Einsatz

### Ausblick

- Verbesserung des Kartenmaterials
- Integration der Gangfolgeplanung



# **Integration der Tourenplanung in die systemgestützte Modellierung und Optimierung großer Transportnetze**

**Dr. Martin Gietz**

**PROLOGOS GmbH  
Hamburg**

Mut zur intelligenten Lösung

# Integration der Tourenplanung in die systemgestützte Modellierung und Optimierung großer Transportnetze

GOR AG Logistik und Verkehr  
Bonn, 9. März 2006

**PROLOGOS**  
Planung und Beratung  
Dr. Gietz, Henneberg, Kindt OHG  
Tempowerkring 4  
21079 Hamburg  
Telefon +49 (0) 40 79012 - 310  
Fax +49 (0) 40 79012 - 319  
Internet [www.prologos.de](http://www.prologos.de)  
E-Mail [info@prologos.de](mailto:info@prologos.de)

Dr. Martin Gietz



## Überblick



### Gliederung

1. Kurzporträt PROLOGOS
2. Große Transportnetze
3. Systemgestützte Modellierung und Optimierung
4. Integration der Tourenplanung
  - 4.1 Fernverkehr
  - 4.2 Nahverkehr
5. Anwendungsfälle



## Kurzporträt PROLOGOS



- Ursprung: Lehrstühle für Unternehmensforschung (Hamburg) und für Produktion und Logistik (Augsburg), **Prof. Dr. Bernhard Fleischmann**
- **PROLOGOS Planung und Beratung** seit 1994 (Hamburg) mit den Geschäftsfeldern:
  - Beratung und Software-Entwicklung
  - Einsatz quantitativer OR-Methoden im Bereich Logistik



- **Schwerpunkte:**
  - Modellierung und Optimierung großer Transportnetze (strategisch)
  - Tourenplanung (strategisch und operativ)

## Große Transportnetze



- Fokus: Nationale und internationale Transportnetze in drei möglichen Ausprägungen

### Few-to-many:

➔ **PRODISI SCO**

- Klassische industrielle Supply Chain, von wenigen Produktionsstätten (ca. 10) zu vielen Kunden (ca. 100.000)

### (Less than) many-to-(less than) many:

➔ **PRODISI RET**

- Handels- und Lieferanten-Netz, von mehreren Lieferanten (ca. 1.000) zu mehreren Geschäften (ca. 1.000)

### Many-to-many:

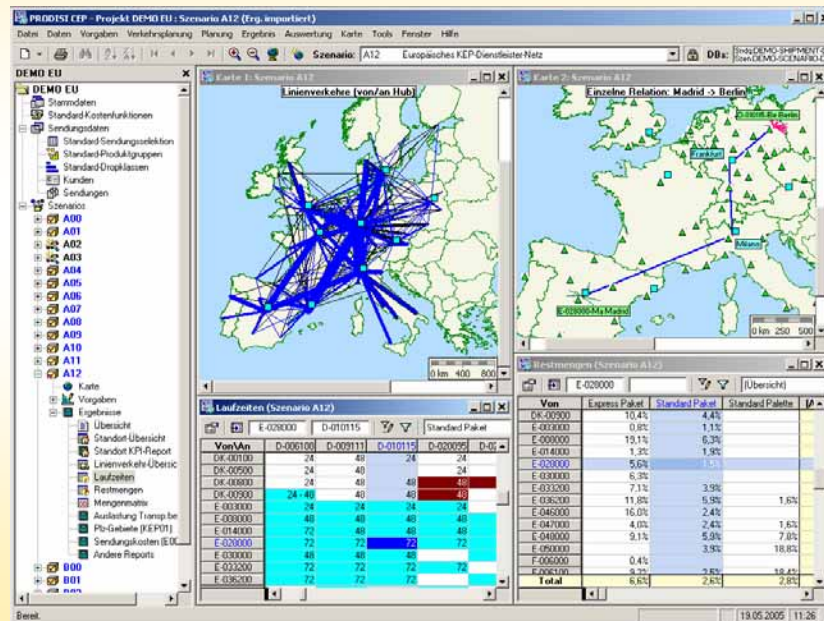
➔ **PRODISI CEP**

- Post- und Paketdienste sowie Stückgut-Speditionen, von vielen Versendern (ca. 100.000) zu vielen Empfängern (ca. 100.000)

## Modellierung und Optimierung



### Systemunterstützung – Beispiel: PRODISI CEP



GOR AG Logistik und Verkehr 9. März 2006

5

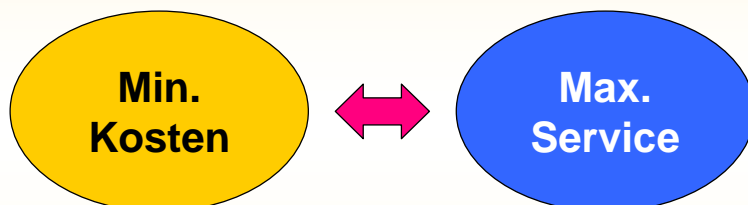
## Modellierung und Optimierung



### Optimierung – PRODISI SCO / RET / CEP

#### Planungsziele:

- Standorte
- Transporte
- Umschläge
- Lieferbereiche
- Laufzeiten



#### Planungsverfahren:

- Hybride nichtlineare Mehrprodukt-Netzwerkflussmethoden
- Optimierungsverfahren (z.B. Transportproblem, Kürzeste Wege)
- Heuristiken (z.B. Local Search, Tabu Search)

GOR AG Logistik und Verkehr 9. März 2006

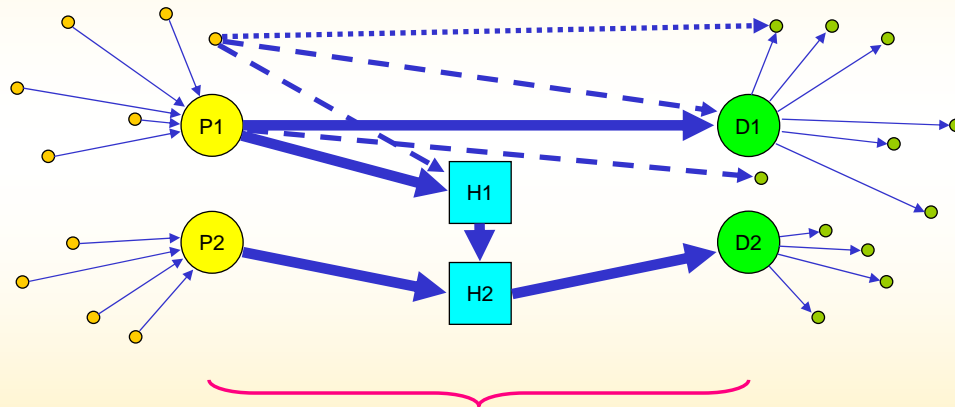
6

## Integration der Tourenplanung



## Fernverkehr – PRODISI CEP (Many-to-many)

### Netzwerkfluss-Modell:



### Linienverkehrsplanung:

- ➔ Transportwege, Kosten
- ➔ Fahrpläne
- ➔ Wagenumlauf, Personaleinsatz

### Strategie

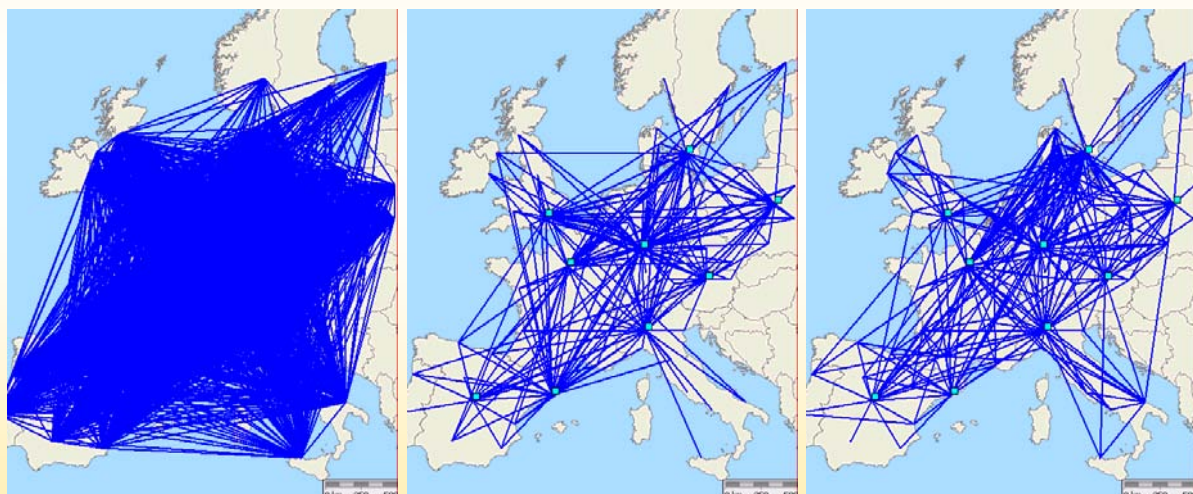
↓  
Taktik

## Integration der Tourenplanung



## Fernverkehr – PRODISI CEP (Many-to-many)

### Linienverkehrsmodelle: Beispiel mit 85 Abhol-/Zustelldepots, 9 Hubs



Web

Hub

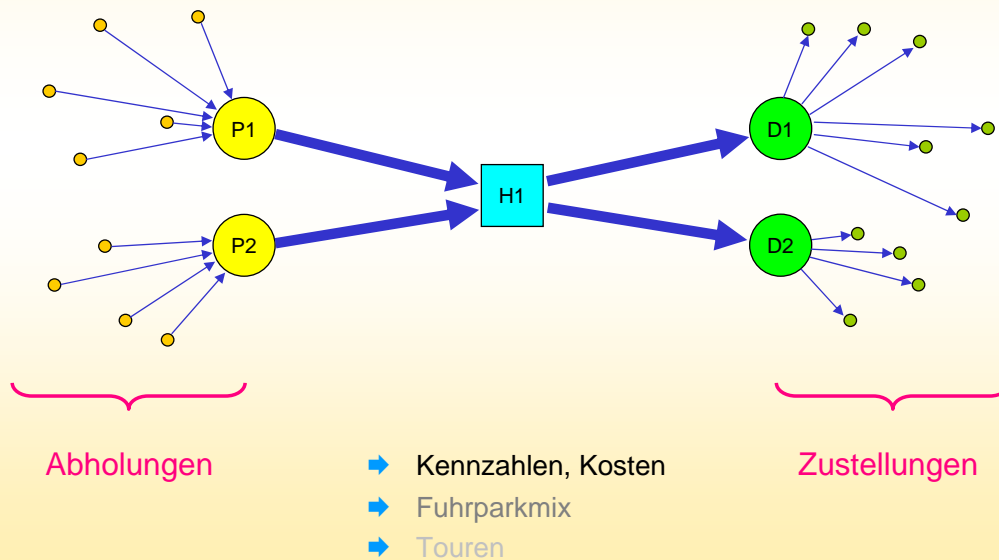
Hub+Web

## Integration der Tourenplanung



## Nahverkehr – PRODISI SCO / RET / CEP (alle Netztypen)

### Netzwerkfluss-Modell:



## Integration der Tourenplanung



## Nahverkehr – Tourensimulation mit "Ringmodell" (Fleischmann)

- **Abschätzung** der Nahverkehrskosten und -kennzahlen über den Ressourcenverbrauch (Zeit und Kapazität):

### Fahrzeug-Daten:

- Fahrzeugkapazität  $Q$
- Max. Einsatzzeit  $T$
- Ø Fahrstrecke  $d_{\Delta}$
- Ø Fahrzeit  $t_{\Delta}$
- Fixe und var. Kosten

### Stopp-Daten:

- Menge  $q$
- Standzeit  $s$
- Depot-Abstand  $d_0$
- Depot-Fahrzeit  $t_0$

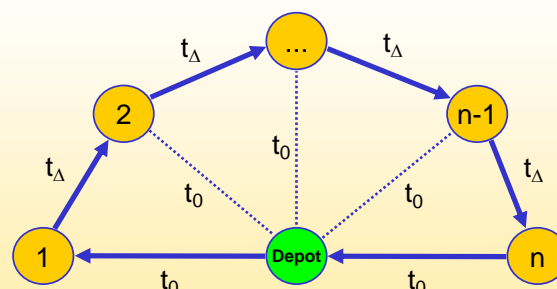
### Berechnung:

Je Sendung wird eine Tour mit  $n$  identischen Stopps konstruiert:

$$n \cdot q \leq Q$$

$$2 t_0 + (n-1) t_{\Delta} + n \cdot s \leq T$$

- ➡ Anteilige Tourkosten und Ressourcen je Sendung



## Integration der Tourenplanung



## Nahverkehr – Tourensimulation mit “Ringmodell” (Fleischmann)

### ■ Beispielrechnung:

#### Fahrzeug-Daten:

- Fahrzeugkapazität  $Q = 28 \text{ cbm}$
- Max. Einsatzzeit  $T = 5:30 \text{ h}$
- Ø Fahrstrecke  $d_{\Delta} = 4 \text{ km}$
- Ø Fahrzeit  $t_{\Delta} = 4 \text{ min}$
- $185 \text{ €/Tag}$  und  $0,35 \text{ €/km}$

#### Stopp-Daten:

- Menge  $q = 0 \text{ cbm}$
- Standzeit  $s = 3 \text{ min}$
- Depot-Abstand  $d_0 = 0 \text{ km}$
- Depot-Fahrzeit  $t_0 = 0 \text{ min}$

#### Berechnung:

Je Sendung wird eine Tour mit  $n$  identischen Stopps konstruiert:

$$n \cdot q \leq Q$$

$$2 t_0 + (n-1) t_{\Delta} + n \cdot s \leq T$$

➔ Anzahl Stopps:  
 $n = (T - 2 t_0 + t_{\Delta}) / (t_{\Delta} + s) = 47$

➔ Kosten der Tour:  
 $185 \text{ €} + 0,35 \text{ €/km} \times 184 \text{ km} = 249,40 \text{ €}$

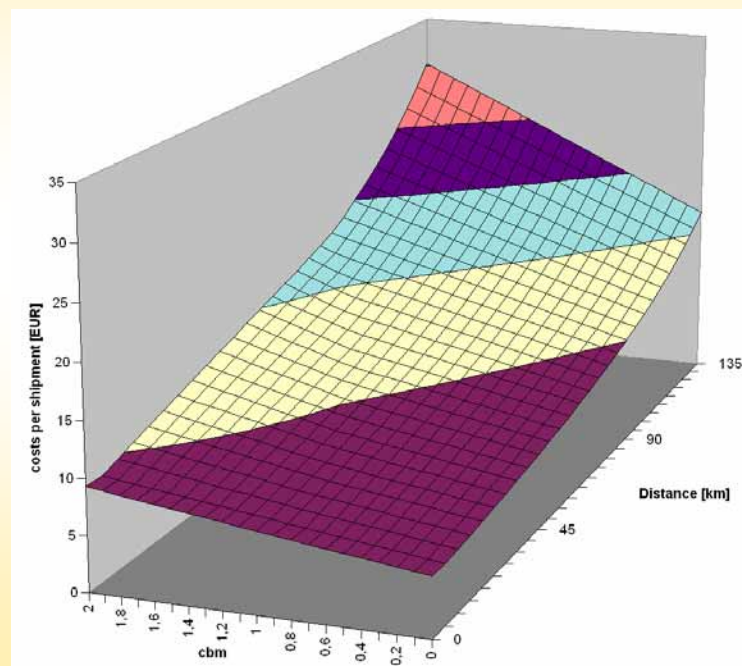
Anteilige Kosten der Sendung:  
 $249,40 \text{ €} / 47 = 5,31 \text{ €}$

## Integration der Tourenplanung



## Nahverkehr – Tourensimulation mit “Ringmodell” (Fleischmann)

### ■ Beispieltarif:



## Integration der Tourenplanung



### Nahverkehr – Tourensimulation mit “Ringmodell” (Fleischmann)

#### Vorteile:

- Flexible Einsatzmöglichkeiten im Rahmen der strategischen Planung
- Objektive Kosten auf Basis Ressourcenverbrauch
- Bewertung jeder einzelnen Sendung
- Sehr gute Erweiterbarkeit:
  - Heterogene Fuhrparks
  - Unterschiedliche Sendungsarten (z.B. Express-Produkte)
  - ...
- Sehr gute Übereinstimmung mit Ergebnissen der detaillierten Tourenplanung

#### Nachteile:

- Parameterabhängigkeit, insbesondere  $d_{\Delta}$  und  $t_{\Delta}$
  - Isolierte Betrachtung der einzelnen Sendungen
- } ➔ Weiterentwicklung!

## Anwendungsfälle



- Expansion in Südosteuropa



- Zusammenführung unterschiedlicher Transportnetze



- Optimale Weiterentwicklung des bestehenden Paket-Logistiknetzes (Standorte, Verkehre)



- Optimierung der Standortstruktur im Frachtbereich (mit Prof. Kummer, WU Wien)



- Optimierung des Distributionsnetzes für Lighting-Produkte



- Integration der Bestfoods-Logistik

# **Heuristische Lösungsverfahren für die Tourenplanung mittelständischer Speditionsunternehmen in Stückgutkooperationen**

**Julia Rieck**

**Technische Universität Clausthal**

Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

# Heuristische Lösungsverfahren für die Tourenplanung mittelständischer Speditionsunternehmen in Stückgutkooperationen

Julia Rieck



AG Logistik und Verkehr  
09. März 2006

Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

Einführung

Spezifikation des Problems

Formulierung des Modells

Heuristische Lösungsverfahren

Performance-Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick



## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- Globalisierung der Beschaffungs- und Absatzmärkte
- Internationalisierung der Wertschöpfungsprozesse
- Zunehmendes Outsourcing logistischer Leistungen



- Schwierige Marktlage für Logistikdienstleister
  - Bewältigung des globalen Güterflusses
  - Finanzielle Belastungen
  - Wettbewerbsdruck
  - Hohe Kundenerwartungen

## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- Stückgüter: heterogene Gestalt, Gewicht von 30 kg bis zu 2,5 Tonnen
- Bildung von Stückgutkooperationen
  - Lückenlose Flächendeckung
  - Zuverlässige Laufzeiten
  - Hohe Auslastung
  - Servicequalität



- Für die effiziente Tourengestaltung sind neue Logistikkonzepte erforderlich.

## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- Knoten der Transportnetze entsprechen den Depots der Kooperationspartner



- Aufbau ähnlich einer Hub-and-Spoke Struktur

## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

## Ausgangsgeschäft

## Eingangsgeschäft



## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- ▶ Im Ausgangsgeschäft müssen feste Abfahrtszeiten des Fernverkehrs beachtet werden.
- ▶ Im Eingangsgeschäft werden Festbeträge von der Kooperation vorgegeben.
- ▶ Im Ausgangsgeschäft können individuell mit dem Auftraggeber Preise ausgehandelt werden.
- ▶ Es ist eine kostengünstige Prozessabwicklung erforderlich.
- ▶ Bedarf an einem Entscheidungsunterstützungssystem.

## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

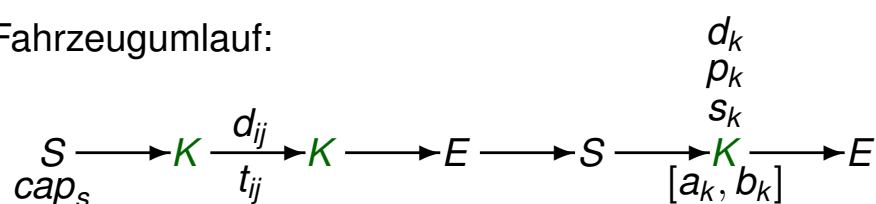
- ▶ Spezielle Ausprägung des Standardproblems der Tourenplanung (VRP)
  - ▶ Dantzig und Ramser 1959
  - ▶ Einsammlungsproblem
- ▶ Heterogene Fahrzeuge
- ▶ Kundenzeitfenster
- ▶ Depotbetriebszeiten
- ▶ Simultane Auslieferung und Einsammlung
- ▶ Mehrfacher Fahrzeugeinsatz
- ▶ Verladerampen mit Belegungszeiten

## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

$K$  Menge der Kunden  
 $R$  Menge der Rampen  
 $M$  Menge der Fahrzeuge  
 $E$  Menge der Enddepots  
 $S$  Menge der Startdepots

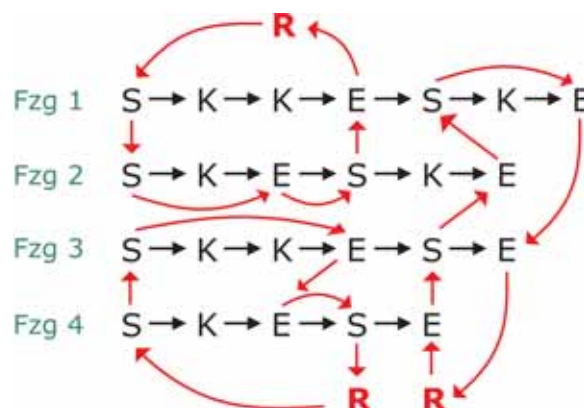
Fahrzeugumlauf:



## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

$X_{ij}$  Binärvariable: 1, wenn von Knoten  $i \in K \cup S$  direkt zu Knoten  $j \in K \cup E$  gefahren wird; 0 sonst  
 $Y_{ij}$  Binärvariable: 1, wenn die Be- bzw. Entladung an Knoten  $i \in S \cup E \cup R$  vor der Be- bzw. Entladung an Knoten  $j \in S \cup E \cup R$  stattfindet; 0 sonst



## Erweiterung des Savings-Algorithmus

### Initialisierung:

- ▶ Tourenplan besteht aus Pendeltouren
- ▶ Zeitfenster einer Pendeltour  $t = (i)$ :  
 $a(t) = a_i, b(t) = b_i, w(t) = 0$  und  $k(t) = s_i$
- ▶ Früheste Start- und Endzeitpunkte einer Pendeltour  $t$ :  
 $ES_t$  und  $LS_t$
- ▶ Zuordnung der Pendeltouren zu den vorhandenen Fahrzeugen und Rampen, ggf. Einführung von fiktiven Fahrzeugen und Rampen
- ▶ Berechnung der Savings (Streckenersparnis) und Sortierung nach nicht aufsteigenden Werten

### Iterationen:

- ▶ Kombinationstour  $t^*$  entsteht durch Verbinden eines Randkunden  $i$  von  $t_1$  mit einem Randkunden  $j$  von  $t_2$ .
- ▶ Wahl einer Tour  $t^*$  mit maximalem Saving, wenn:
  - ▶ Kapazitätsbedarf von  $t^*$  kleiner gleich  $cap_{max}$  ist.
  - ▶ Tourdauer von  $t^*$  kleiner oder gleich der maximalen Fahrzeit  $T_{max}$  ist.
  - ▶  $a(t_1) \leq b(t_2) - t_{ij} - w(t_1) - k(t_1)$  gilt. Berechnung des Zeitfensters  $[a(t^*), b(t^*)]$ .
  - ▶  $LS_{t^*} \geq ES_{t^*}$  gilt.
- ▶ Zuordnungsalgorithmus findet eine Zuordnung der Touren zu den Fahrzeugen und Verladerampen.

## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

## Zuordnungsalgorithmus:

Die Touren des Tourenplans werden den Fahrzeugen und Rampen zugeordnet.

- Sortierung der Touren nach nicht absteigendem Kapazitätsbedarf
- Sortierung der Fahrzeuge nach nicht absteigenden Kapazitäten

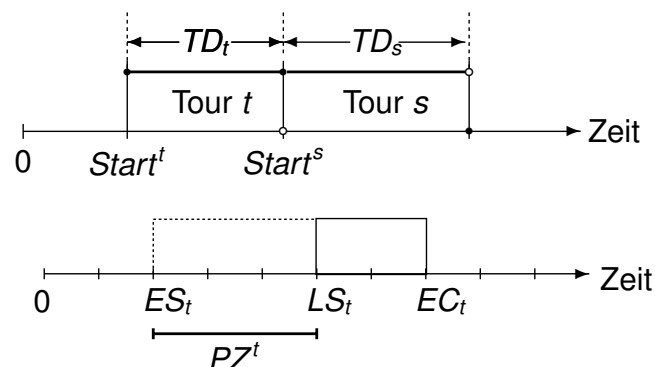
Kann ein Fahrzeug  $v \in M$  die Tour  $t$  durchführen?



## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- Wird  $v \in M$  bereits in Anspruch genommen?

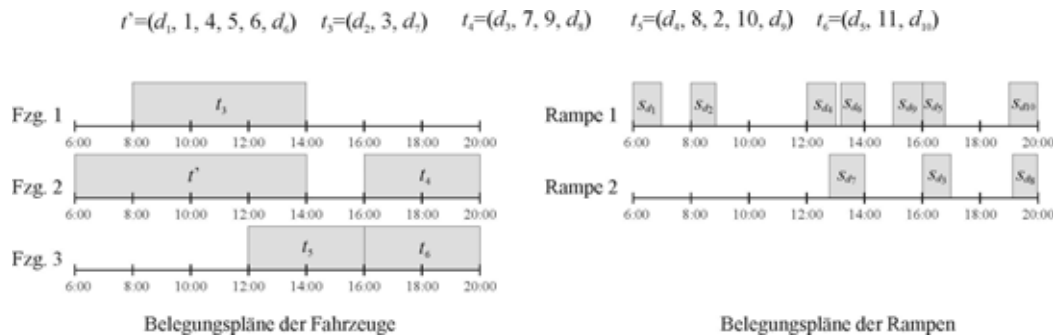


- Ist eine Rampe zur Beladung frei?
- Ist eine Rampe zur Entladung frei?

Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

## Zuordnung der Touren zu Fahrzeugen und Rampen.



Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

## Randomisierte Tourenzusammenlegung

- ▶ Erzeugung mehrerer Lösungen durch Verwendung randomisierter Savings
- ▶ Anwendung des Multi-Pass Regret-Based Biased Sampling
  - ▶ Basisgröße  $\pi(s)$  entspricht dem Savingswert  $s$
  - ▶  $\psi(s) := \pi(s) - \min_h \pi(h)$   
entspricht der absoluten Differenz zwischen dem kleinsten Savingswert  $h$  und  $s$
  - ▶ Auswahlwahrscheinlichkeit  

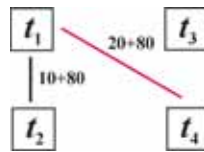
$$\Psi(s) := \frac{(\psi(s)+1)^\alpha}{\sum_{s'} (\psi(s')+1)^\alpha}$$
 mit  $\alpha \in [0, \infty)$
- ▶ Abbruchkriterium z.B. maximale Zeitdauer oder maximale Iterationszahl erreicht

## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

## Randomisierte Zuordnung von Touren zu Fahrzeugen/Rampen

### Lösung eines Maximalen Summen-Matchingsproblems



#### 1. sortiere()

Sortierung der Touren nach nicht absteigendem Kapazitätsbedarf, z.B.  $[t_3, t_1, t_4, t_2]$  mit  $cap = [40, 30, 20, 10]$

#### 2. sortierpaare()

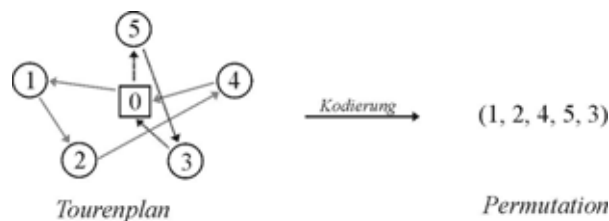
Bildung von Tourpaaren, wobei die Touren eines Paares hintereinander ausführbar sind, z.B.  $\{t_1, t_2\}, \{t_1, t_4\}$

- ▶ Tourpaar  $\{t_1, t_2\}$  und die Touren  $t_3$  sowie  $t_4$
- ▶ Sortierung:  $[t_3, t_2, t_1, t_4]$

## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- ▶ Verwendung einer permutationsbasierten Kodierung
- ▶ Abbildung der Anfahrtsreihenfolge der Kunden innerhalb der Touren
- ▶ Übertrag der Touren beginnend mit der Tour, die den größten Kapazitätsbedarf besitzt usw.



- ▶ Zur Dekodierung ist eine Konstruktionsheuristik erforderlich.



## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- Konstruktionsheuristik basiert auf dem Sweep-Algorithmus
- Berücksichtigung der Kunden gemäß der permutationsbasierten Kodierung
- Begonnen wird mit dem ersten Kunden der Permutation



## Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- Ausgangspopulation bestehend aus 100 Individuen  
Ein mit dem Eröffnungsverfahren generiertes Individuum und 99 zufällig erzeugte Individuen
- Bestimmung der Fitness  
Dekodieren und Zielfunktionswerte bestimmen
- Führe 10-mal aus:
  - Double Roulette-Wheel Selektion
  - Rekombination der selektierten Individuen
  - Mutation
  - Fitnessbestimmung
- Aufbau der neuen Population  
Elitestrategie und fitnessproportionale Auswahl ohne Dubletten

Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
AusblickRekombination: Verwendung eines *OX*-Operators

Elternteil 1: (1, 8, 3, 5, 2, 6, 7, 4)

Elternteil 2: (4, 7, 6, 2, 1, 3, 5, 8)

*OX*-Operator

Kind 1: (4, 7, 1, 5, 2, 6, 3, 8)

Kind 2: (8, 5, 6, 2, 1, 3, 7, 4)

Mutation: Verwendung des *SWAP*-Operators

z.B. Permutation (1, 2, 3, 4, 5) → (1, 2, 5, 4, 3)

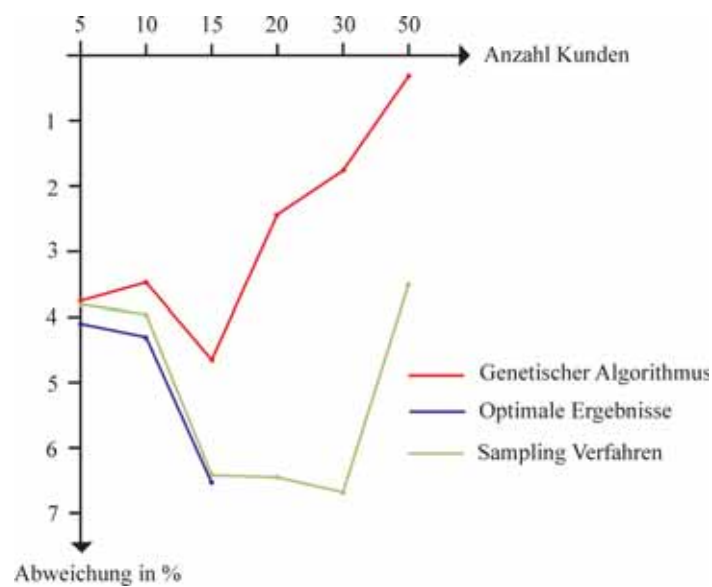
Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

Testset	1	2	3	4	5	6
K	5	10	15	20	30	50
M	3	5	7	7	9	12
R	1	2	2	3	3	5

- Für Instanzen der ersten drei Testsets liegen optimale Ergebnisse vor.
- Durchschnittliche Abweichung des Eröffnungsverfahren zum Optimum (4,1%, 4,3% und 6,5%).

Einführung

Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- Das Sampling Verfahren dominiert den GA.

Einführung

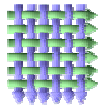
Spezifikation  
des ProblemsFormulierung  
des ModellsHeuristische  
Lösungs-  
verfahrenPerformance-  
ErgebnisseZusammen-  
fassung und  
Ausblick

- Testen der Heuristiken anhand von realen Daten
- Implementierung und Test von weiteren Lösungsverfahren
- Anpassungen für den realen Einsatz

# **Optimierung des Wechselbrückentransports - ein Spezialfall der Tourenplanung bei großen Transportnetzen**

**Prof. Dr. Hans-Werner Graf**

**BiTS  
Iserlohn**



Collaborative Research Center 559  
**Modelling of Large Logistic  
Networks**



**Fraunhofer**  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## **Optimierung des Wechselbrückentransports - ein Spezialfall der Tourenplanung bei großen Transportnetzen**

**Prof. Dr. Hans-Werner Graf**  
**Dozent für Wirtschaftsinformatik und Logistik**

**[hanswerner.graf@bits-iserlohn.de](mailto:hanswerner.graf@bits-iserlohn.de)**

Prof. Dr. Hans-Werner Graf  
Business and Information Technology School gGmbH  
Reiterweg 26b  
58636 Iserlohn  
Tel. 0 23 71/77 65 17  
[www.bits-iserlohn.de](http://www.bits-iserlohn.de)

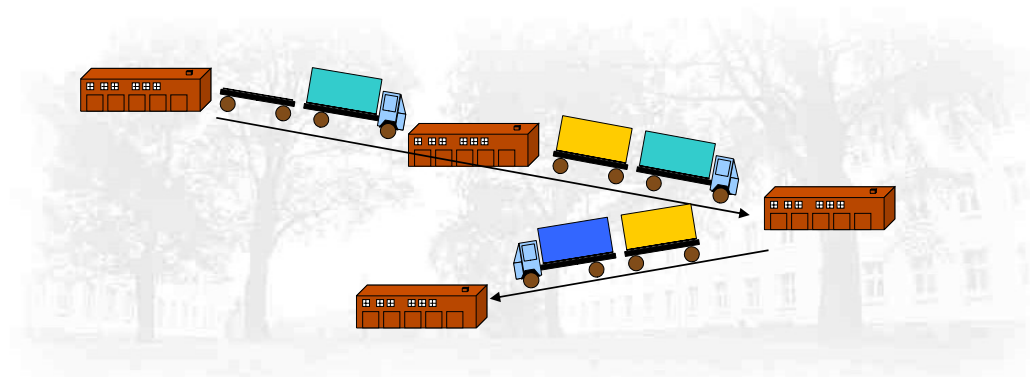
GOR\_Bonn\_2006\_02\_09.ppt

## **Übersicht**

- **Problem der Wechselbrückenoptimierung**
- **Klassisches Vorgehensweisen**
- **Erweiterte Vorgehensweisen**
- **Savings-Heuristik**
- **Sternförmige Konsolidierung**
- **Stern-Heuristik**
- **Beispiele**
- **Zusammenfassung / Ausblick**

## Problemstellung

- Wechselbrücken ermöglichen neben der Entkoppelung von Zugmaschine und Ladeeinheit einen schnellen Tausch von Ladeeinheiten bei der Transportdurchführung (Umbrücken)
- Anders als bei Anhängern kann dabei auch die Ladung der Zugmaschine getauscht werden



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 3

## Problemstellung

- Gegeben ist eine Anzahl von Transportaufträgen für einzelne Wechselbrücken mit Startort, Zielort und Zeitfenster-Vorgabe.
- Gesucht ist eine Zuordnung von Aufträgen zu (einer unbeschränkten Anzahl von) Fahrzeugen sowie eine Festlegung der Fahrstrecke, so dass die Summe der Fahrzeiten minimal wird
- In dieser Aufgabenstellung ist kein Rundlauf gefordert, weil Fahrzeuge am Zielort ggf. weiter eingesetzt werden

GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

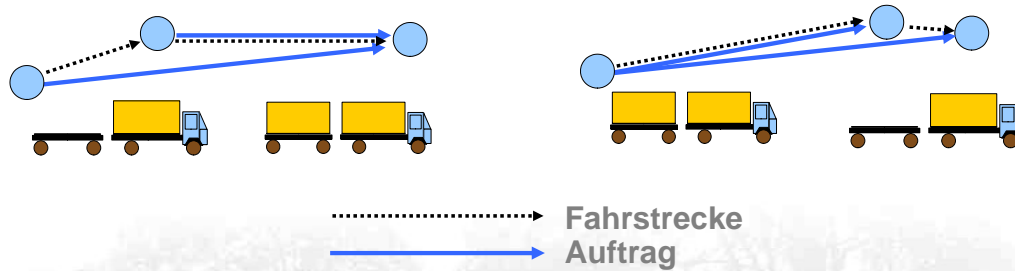
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

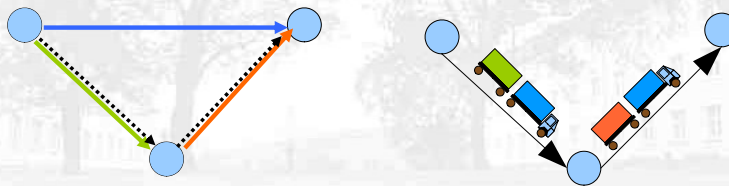
P. 4

## Klassische Vorgehensweisen

### Linienbildung:

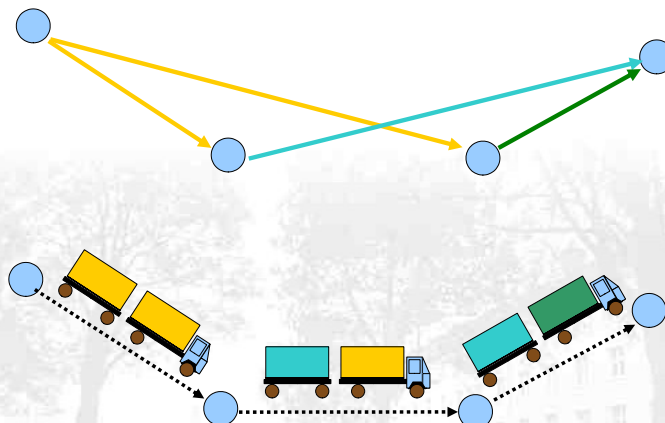


### Dreiecksverkehr:



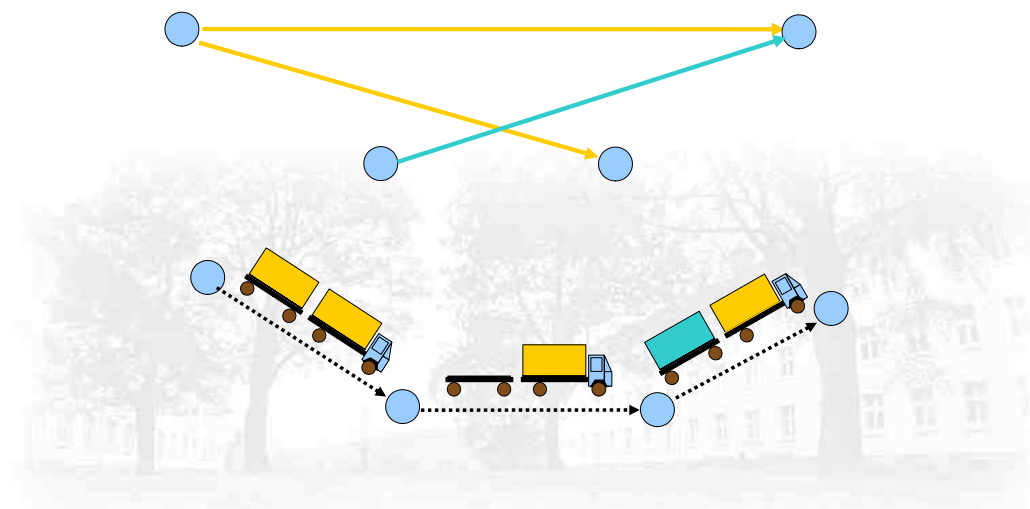
## Erweiterte Vorgehensweisen

### Kombinierte Linienbildung:



## Erweiterte Vorgehensweisen

### Dreiecksverkehr mit Anschlussfahrt:



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

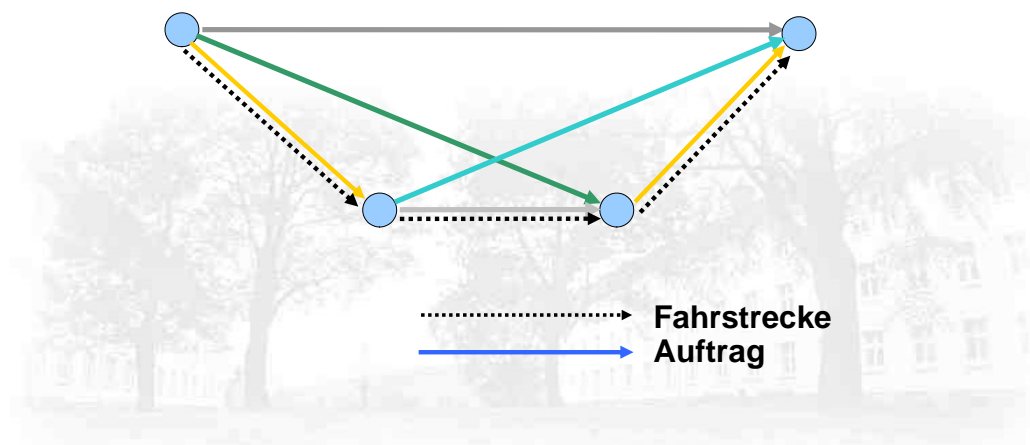
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 7

## Verallgemeinertes Schema

### Grundschema der Kombinationen:



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

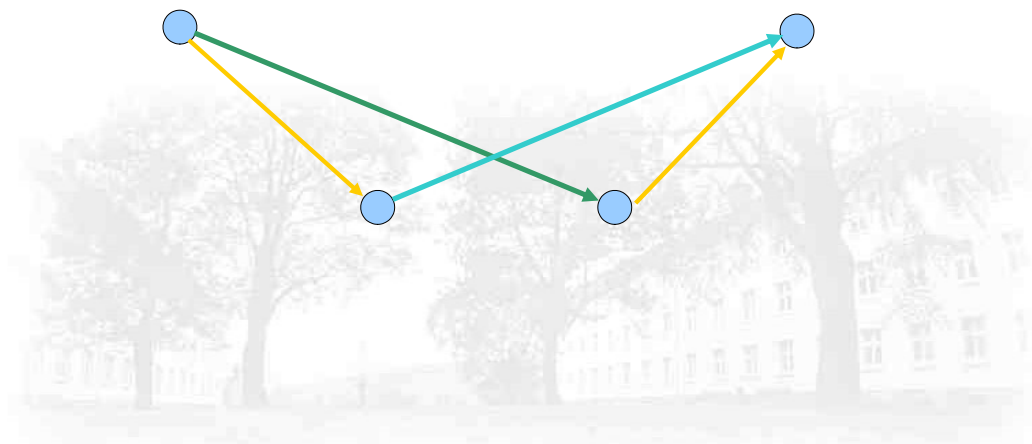
B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 8



## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 1:



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

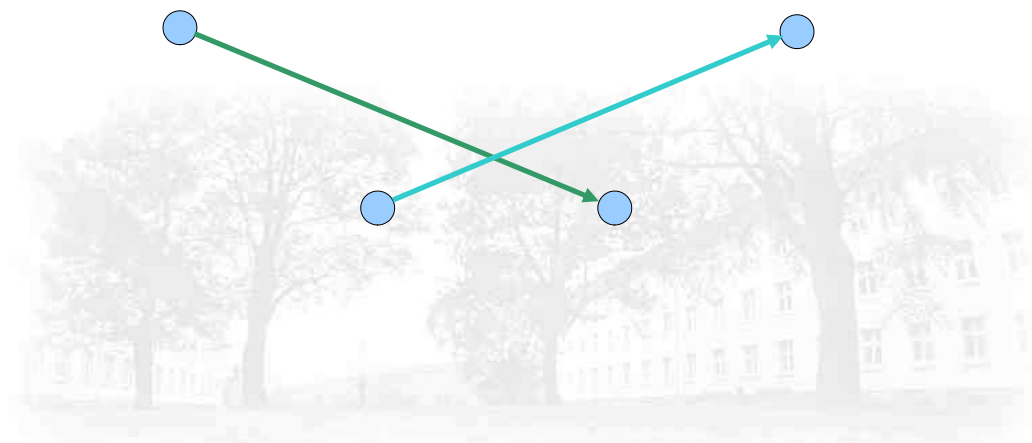
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 9

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 1 (a):



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

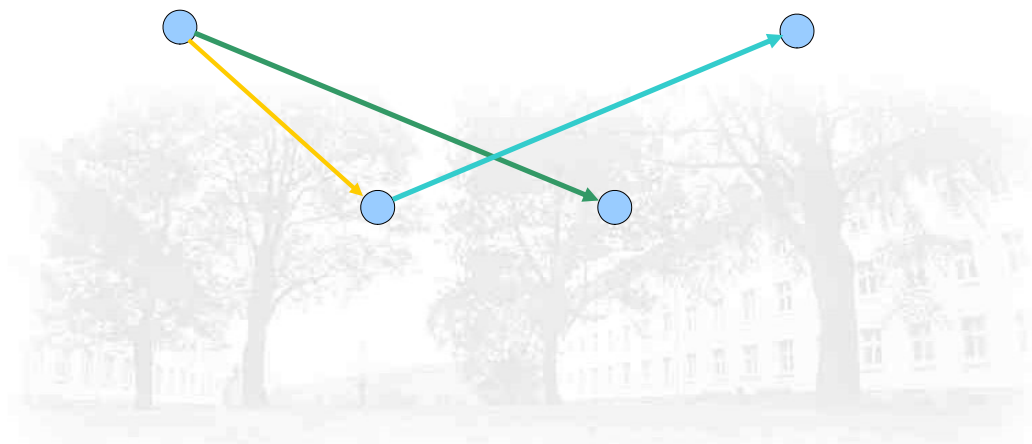
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 10

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 1(b):



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

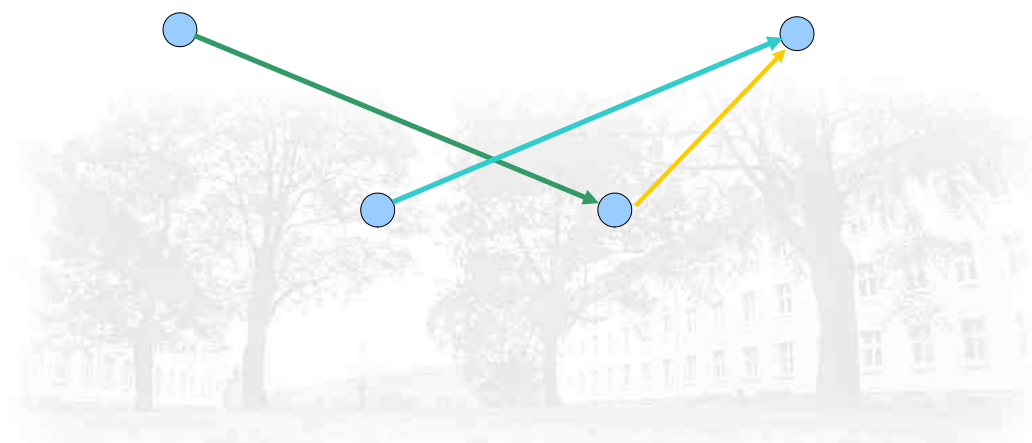
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 11

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 1 (c):



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

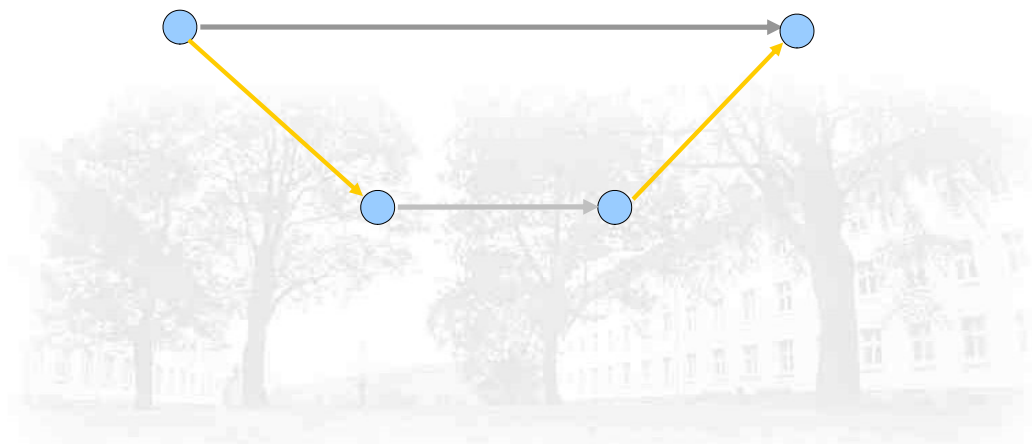
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 12

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 2:



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

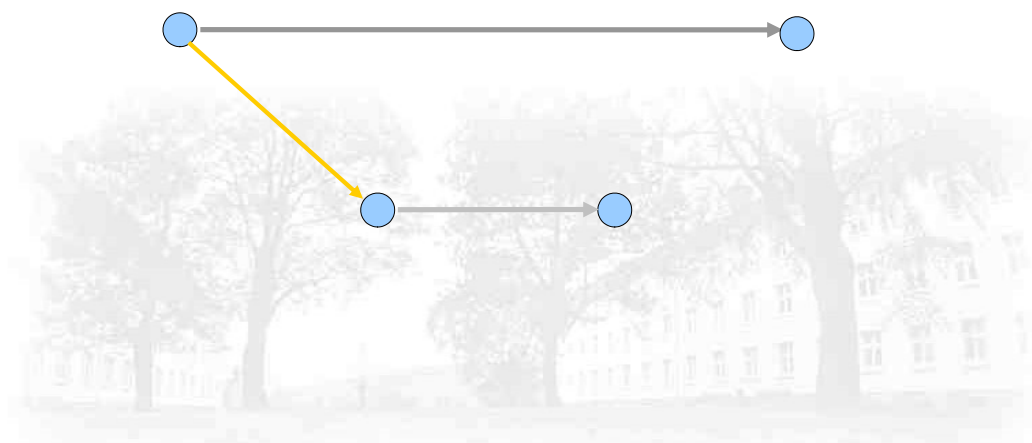
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 13

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 2 (a):



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

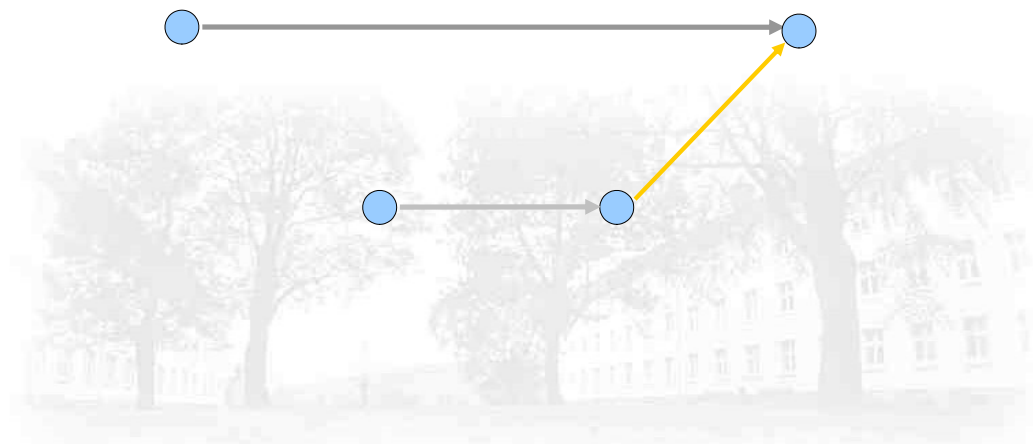
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 14

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 2 (b):



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

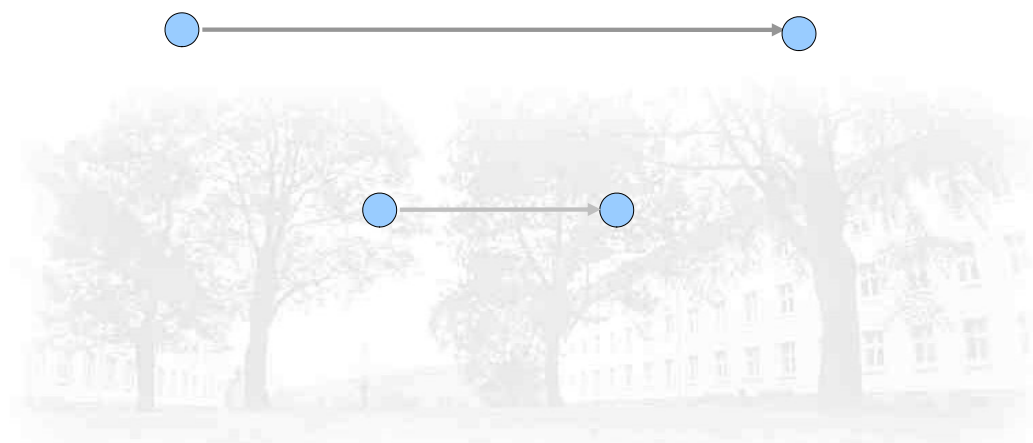
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 15

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 2 (c):



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

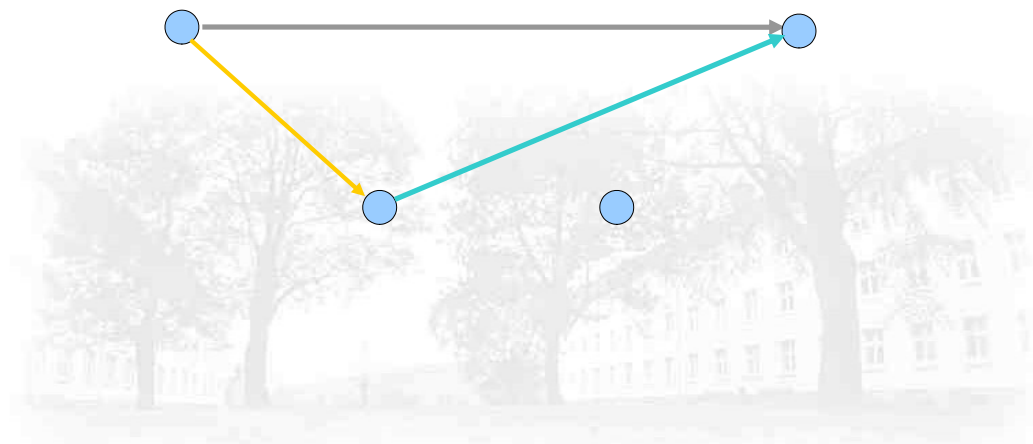
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 16

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 3:



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

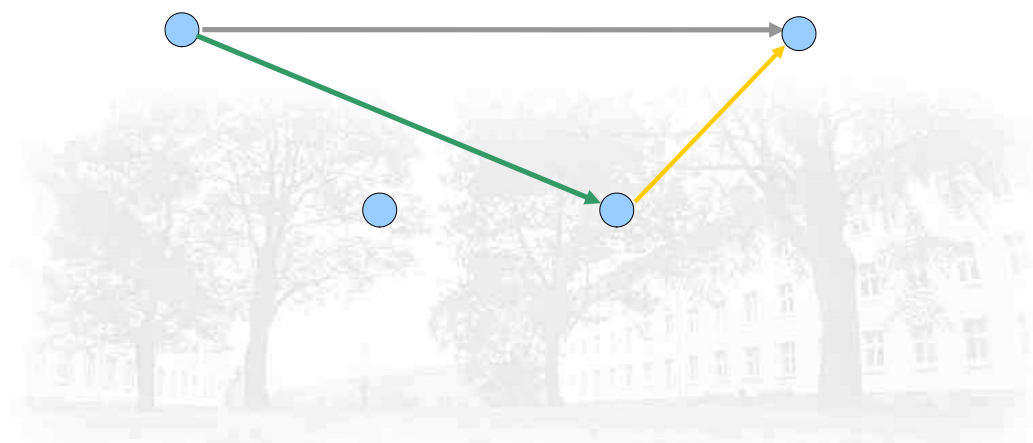
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 17

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 4:



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

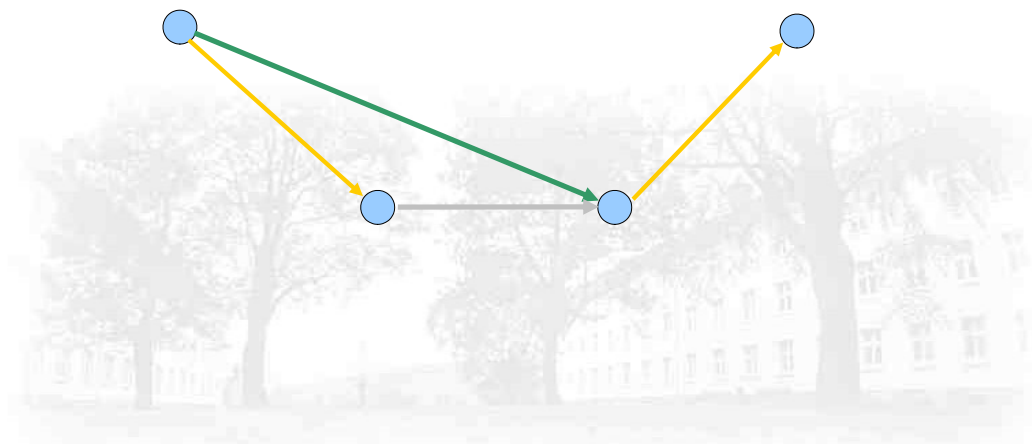
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 18

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 5:



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

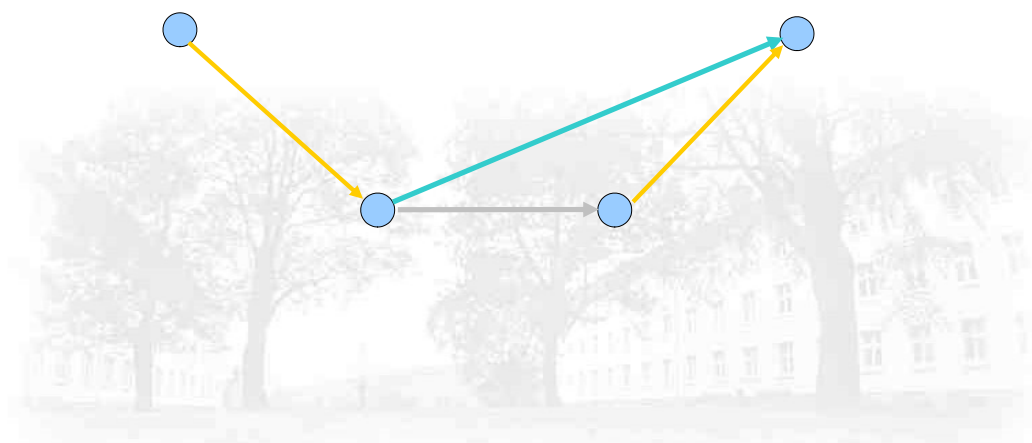
Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 19

## Verallgemeinertes Schema

### Kombination 6:



GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

Fraunhofer  
IML  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 20

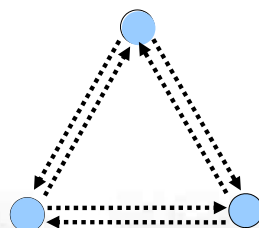
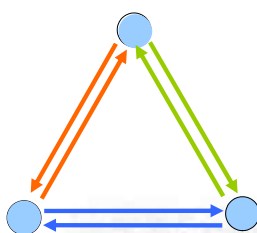
## Savings-Heuristik

Für alle Kombination von Aufträgen  $a_{ij}$ ,  $a_{kl}$ :

1. Bestimme optimale Reihenfolge für  $i, j, k, l$  ( $=i', j', k', l'$ )
2. Prüfe Reihenfolge auf Zeitfensterrestriktion
3. Bestimme Ergänzungsaufträge  $a_{i'j'}$  und/oder  $a_{k'l'}$   
Setze  $\delta_1$  bzw.  $\delta_2$ , falls passendes  $a_{i'j'}$  bzw.  $a_{k'l'}$  existiert
4.  $SVG := d(i, j) + d(k, l) - d(i', j') \cdot \delta_1 - d(j', k') - d(k', l') \cdot \delta_2$

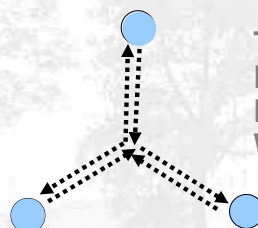
## Sternförmige Konsolidierung

Bei paarigen Einzelaufträgen zwischen drei Depots:



Abstand zwischen Depots = 100 km

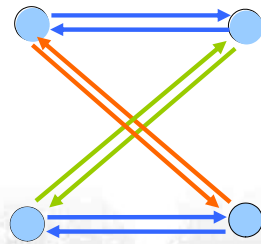
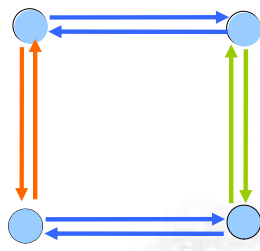
Durchführung mit jeweils einem FZ mit einer Wechselbrücke im Pendelverkehr = 600 km



Treffpunkt im Mittelpunkt, Durchführung mit jeweils einem FZ im Pendelverkehr mit zwei Wechselbrücken = 346 km

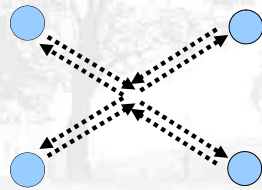
## Sternförmige Konsolidierung

Bei paarigen Einzelaufträgen zwischen vier Depots:



Kanten des Vierecks = 100 km

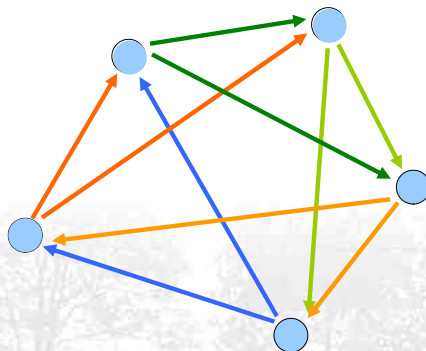
Durchführung mit jeweils einem FZ mit einer Wechselbrücke im Pendelverkehr = 800 km bzw. 966 km



Treffpunkt im Mittelpunkt, Durchführung mit jeweils einem FZ im Pendelverkehr mit zwei Wechselbrücken = 566 km

## Sternförmige Konsolidierung

Paarigkeit der Relationen ist keine Voraussetzung:



Gesucht ist eine Teilmenge von Depots und Aufträgen, so dass jedes Depot genau zwei Wechselbrücken an die anderen Depots dieser Teilmenge abgeben und genau zwei Wechselbrücken von andern Depots empfangen!



## Stern-Heuristik

### „Beschränktes“ Backtracking:

1. Begrenze die Anzahl der Depots der Konsolidierung
2. Wenn Kombination gefunden, prüfe auf Zeitschranken
3. Bestimme nur die ersten n zulässigen Kombinationen, wähle aus diesen nach einem Greedy-Ansatz (max. Einsparung pro WB)
4. Zusätzlich: Timeout bei Suche

Zur Bewertung wird das Depot mit der kürzesten summierten Distanz zu den gewählten Depots der Konsolidierung verwendet.

GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 25

## Mengenmatrix 30 Depots

Depot von/nach	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Summe	
1			1			1		1					1	1					1	1	1	1	1	1	1		1			1	13	
2			1	1		1		1					1	1		1							1	1	1						11	
3			1					1					1								1	1		1	1	1					1	7
4		1					1		1							1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	13
5			1	1					1	1				1	1				1	1		1	1	1	1	1	1	1			1	12
6		1	1			1		1				1							1	1		1	1	1		1			1		6	
7												1	1		1	1		1	1		1	1	1		1			1			11	
8		1						1		1	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1				1	1		12	
9			1		1									1	1	1		1		1					1	1	1				7	
10			1	1	1		1						1	1	1	1	1		1		1		1			1	1				13	
11			1	1	1	1	1	1	1					1	1			1		1		1		1		1	1	1			15	
12			1	1				1				1						1	1		1			1	1	1	1				10	
13				1	1		1	1	1		1							1		1	1	1	1	1	1	1	1	1			14	
14									1	1	1							1		1		1	1	1	1			1	1		11	
15				1	1	1	1						1	1					1		1		1	1	1	1	1	1			8	
16		1					1		1	1		1	1		1		1				1		1	1		1					11	
17		1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1		1			1		1		1	1	1					17	
18		1	1	1	1	1		1		1		1	1			1					1	1	1	1	1	1			1		14	
19		1	1	1	1		1		1		1		1							1	1		1	1	1	1			1		13	
20			1	1	1				1	1	1		1			1				1		1	1	1	1	1		1			11	
21								1	1		1	1				1				1			1	1	1		1	1			8	
22		1			1			1	1					1	1		1	1				1	1	1	1		1	1	1		12	
23				1		1	1							1	1	1	1				1	1		1	1						10	
24		1	1	1	1	1		1	1			1	1			1			1			1	1	1			1				14	
25		1				1									1					1						1	1	1	1		8	
26			1	1		1	1			1	1	1	1		1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1			1		14	
27				1	1	1								1	1					1	1	1	1	1	1			1			11	
28			1	1		1	1	1	1	1	1	1	1						1		1		1	1	1						11	
29			1	1		1	1	1	1				1						1		1	1	1	1	1						12	
30		1	1		1						1	1	1	1	1	1				1		1	1	1	1	1	1				11	
Summe	10	11	15	14	13	11	11	12	9	11	10	11	15	11	10	11	7	9	9	13	13	12	14	11	15	9	10	7	12	14	340	

340 WB

GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 26

## Teilmenge von 24 Depots

Depot von/nach	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Summe
1			1			1			1				1	1					1	1	1	1	1		1	1				1	13
2			1	1		1			1				1	1		1					1	1	1	1	1						11
3			1						1				1	1							1	1			1	1					7
4			1					1		1						1	1				1	1	1	1	1	1	1	1			13
5			1	1				1	1	1			1	1			1	1		1	1	1	1	1	1	1	1				12
6			1	1		1		1					1	1			1	1		1	1	1	1				1				6
7													1	1		1	1		1	1	1	1	1			1					11
8													1	1	1		1		1	1	1	1	1	1							12
9				1	1										1	1		1		1	1	1	1	1		1	1				7
10				1	1	1		1						1	1	1	1	1		1	1	1	1	1			1	1			13
11				1	1	1	1	1	1	1					1	1		1		1	1	1	1	1		1	1	1			15
12				1	1			1		1									1	1		1	1			1	1				10
13					1	1		1	1	1									1	1		1	1	1	1	1	1	1			14
14													1	1				1		1	1	1	1	1	1		1	1	1		11
15					1	1	1	1													1	1			1	1	1				8
16								1	1				1	1		1	1		1		1	1	1	1	1	1					11
17				1	1	1	1	1	1				1	1	1	1	1		1		1			1	1	1					17
18				1	1	1	1	1					1	1	1	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1				14
19				1	1	1		1		1			1	1							1	1		1	1	1	1				13
20				1	1	1		1		1											1	1		1	1	1	1				11
21										1	1		1	1							1	1		1	1	1	1				8
22										1	1		1	1							1	1		1	1	1	1				12
23										1	1		1	1							1	1		1	1	1	1				10
24										1	1		1	1							1	1		1	1	1	1				14
25																					1						1	1	1		8
26																					1	1	1	1	1	1	1				14
27																					1	1	1	1	1	1	1				11
28																					1	1	1	1	1	1	1				11
29																					1	1	1	1	1	1	1				12
30																					1	1	1	1	1	1	1				11
Summe	10	11	15	14	13	11	11	12	9	11	10	11	15	11	10	11	7	9	9	13	13	12	14	11	15	9	10	7	12	14	340

Teilmenge = 48 WB

GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

P. 27

## Stern-Heuristik

### Zusammengesetzte Heuristik:

1. Backtracking für 8 Depots, jeweils beste aus ersten fünf Lösungen
2. Wenn Erfolg, entferne Aufträge aus Matrix und wiederhole 1.
3. Savings-Heuristik für verbleibende Aufträge

GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

P. 28

## Berechnungsergebnisse

Bewertung: Fahrzeit in Minuten

	30 Depots 170 WB		30 Depots 340 WB		52 Depots 378 WB		52 Depots 408 WB	
<b>Einzelverkehre</b>	93.264	100,0%	150.153	100,0%	111.874	100,0%	120.204	100,0%
<b>Zentralhub*</b>	89.741	96,2%	141.723	94,4%	110.768	99,0%	117.412	97,7%
<b>Traditionell</b>	85.688	91,9%	132.622	88,3%	101.618	90,8%	110.213	91,7%
<b>Savings-Heuristik</b>	84.149	90,2%	131.825	87,8%	101.116	90,4%	109.671	91,2%
<b>Stern-Heuristik</b>	74.166	79,5%	111.935	74,5%	87.507	78,2%	94.655	78,7%

<b>Laufzeit**</b>	0,548 s	1,54s	11,85 s	15,14 s
-------------------	---------	-------	---------	---------

\* ohne weitere Konsolidierung der Brücken, die aus Zeitfenstergründen direkt fahren

\*\* Pentium IV; 2,5 GHz; 512 MB Speicher

GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 29

## Zusammenfassung und Ausblick

- Wechselbrückenoptimierung bietet mehr Varianten, als allgemein vermutet
- Vorgestellte Methodik ist noch lange nicht ausgereizt
- Methodische Erweiterungsmöglichkeiten:
  - Kombination der Stern-Konsolidierung mit PDPTW-Verfahren
  - Erweiterung um Meta-Heuristiken
  - Ermittlung unterer Schranken für Kosten
  - ...
- Verallgemeinerung der Aufgabenstellung:
  - Umlaufplanung
  - multimodaler Transport
  - Mehrere Depots in einer Wechselbrücke; Beiladung
  - ...

GOR-Tagung 9./10. Feb. 2006, Bonn

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

B I T S  
DIE UNTERNEHMER-HOCHSCHULE

P. 30

# **Effiziente Organisationsstrukturen in Transportnetzwerken**

**Kai Krause**

**Universität zu Köln**

# Effiziente Organisationsstrukturen in Transportnetzwerken

Eine simulationsgestützte Analyse zur Bewertung  
der standardisierten Produktion von Teil- und  
Komplettladungsverkehren

Kai Krause  
(Bonn, 10. März 2006)

GOR – Tagung, 09/10.03.06

1. Ausgangssituation
2. Annahmen und Zielsetzungen
3. Modellaufbau und -ablauf
4. Ergebnisse

# Trends & Entwicklungen im Transportdienstleistungssektor

## Phase1: „Kooperation“ (90er)

Mittelständische Spediteure kooperieren  
Ziel: Größere Flächenabdeckung

IDS, CODIS,  
ILS-EAST,...

## Phase 2: „Konzentration“ (seit '98)

Internationale Fusionen und Akquisitionen  
großer Logistikkonzerne  
Ziele: Aufbau globaler Netzwerke,  
Standortunabhängigkeit

UPS: Fritz,  
Sinotrans

FedEx: TowerGroup,  
Am. Freightways

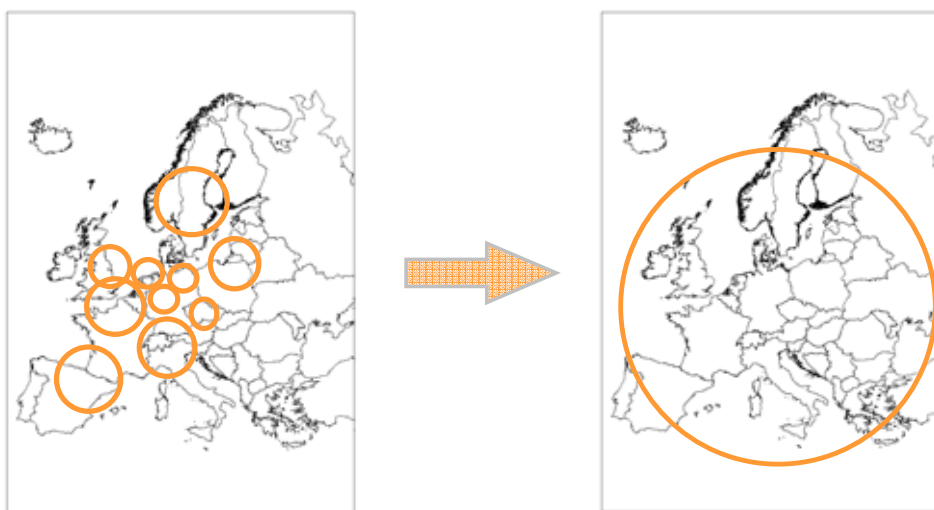
## Phase 3: „Integration“ (seit '03)

Integration der unterschiedlichen Produkte  
und Leistungen innerhalb der Netze  
Ziel: Ausschöpfen der Synergien durch  
Etablierung von Standards

DPWN: DHL,  
Danzas, Airborne,...

DHL, Exel (vor  
Akquisition),...

## Situation heute

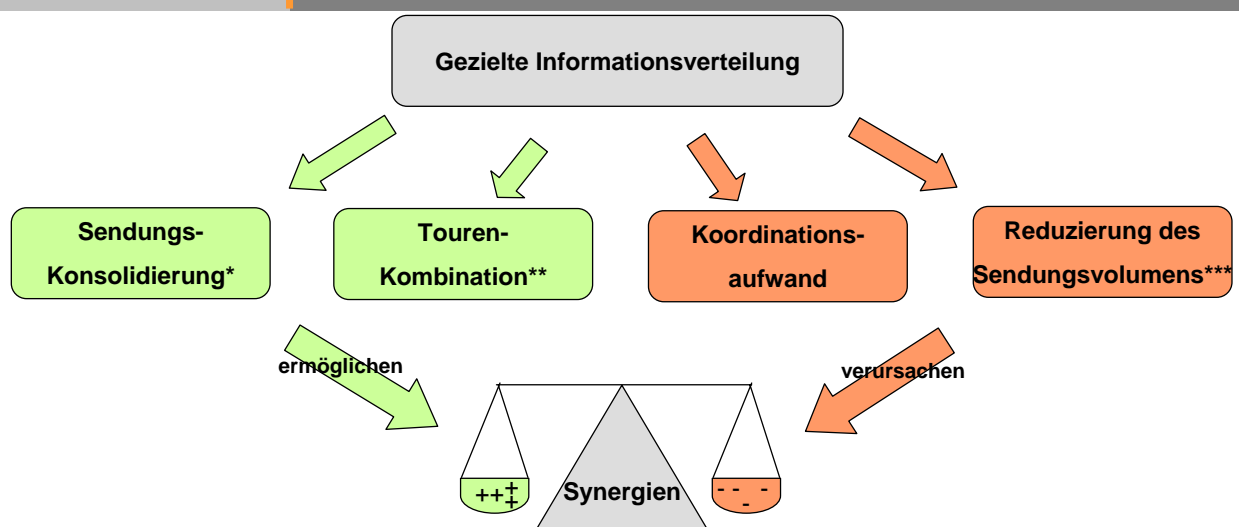


**Herausforderung:** Dezentral und bislang selbständig geführte Teilorganisationen sollen zukünftig gemeinsame Ressourcen nutzen und kooperieren

**Frage:** Was sind optimale (i.S.v. effiziente) Organisationsformen?

1. Ausgangssituation
2. Annahmen und Zielsetzungen
3. Modellaufbau und -ablauf
4. Ergebnisse

## Informationsverteilung als Synergietreiber in Transportnetzwerken



\* **Sendungskonsolidierung** ist die Zusammenfassung zweier oder mehrerer Sendungen auf *gleichen* Relationen mit sich *überschneidenden* Zeitfenstern zu Touren.

\*\* **Tourenkombination** ist die Zusammenfassung zweier oder mehrerer Touren auf *unterschiedlichen* Relationen mit *aufeinanderfolgenden* Zeitfenstern zu Rundverkehren.

\*\*\* Ein hoher Grad an Informationsverteilung bedingt eine hohe Standardisierung der Prozesse, was zu Kundenverlust und damit zu einem Rückgang des Sendungsvolumens führen kann.

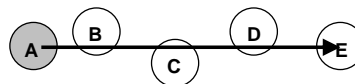
## Hypothesengerüst

1. Zunehmende (gezielte) Informationsverteilung schafft Potenziale zur Sendungskonsolidierung und Tourenkombination.
2. Zunehmende (gezielte) Informationsverteilung verursacht
  - a) erhöhten Koordinations- und Kommunikationsaufwand sowie
  - b) eine Reduzierung des Sendungsvolumens.
3. Es existiert ein optimaler Informationsverteilungsgrad in Transportnetzwerken, bei dem die Differenz zwischen positiven und negativen Synergien maximal ist.

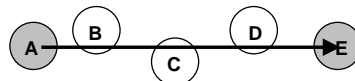
## Koordinationsform und Sektorgröße als Stellhebel zur Beeinflussung der Informationsverteilung

- Die Form der Koordination beschreibt die Art und Weise, wie die Sektoren kommunizieren und interagieren.

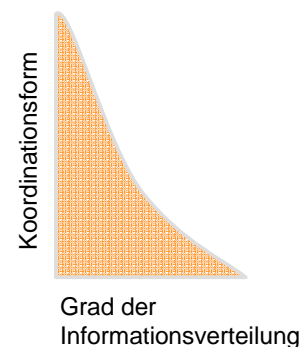
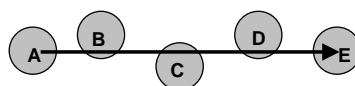
## 1. Unilaterale Koordinationsform



## 2. Bilaterale Koordinationsform



## 3. Multilaterale Koordinationsform



- Die Sektorgröße bezeichnet die geographische Ausdehnung des Aktionsraumes eines Sektors. Sie ist ein Indikator für das Informationsvolumen, das innerhalb eines Sektors verarbeitet werden muss.



1. Ausgangssituation
2. Annahmen und Zielsetzungen
3. Modellaufbau und -ablauf
4. Ergebnisse

## Problemzerlegung

	Analyseverfahren	
	Heuristik	Simulation
<b>Zielsetzung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ermittlung der szenariospezifischen Transportkosten mit Hilfe eines Tourenplans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abbildung der Szenarien als Kombination aus Sektorgröße und Koordinationsform</li> <li>▪ Abbildung unterschiedlicher Sendungsvolumina</li> <li>▪ Quantifizierung der Synergien</li> </ul>
<b>Methodik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Berechnung der Potenziale zur Sendungskonsolidierung und Tourenkombination unter definierten Zeit- und Kapazitätsrestriktionen</li> <li>▪ Grundprinzip: Greedy-Heuristik zur Lösung eines Pickup-and-Delivery-Problems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sektorgröße: Veränderung der Sektoranzahl und des sektorspezifischen Aktionsradius</li> <li>▪ Koordinationsform: Veränderung der „sichtbaren“ Sendungsinformation</li> <li>▪ Reduzierung des Sendungsvolumens mit zunehmender Sektorgröße</li> <li>▪ Berechnung der Synergien als Transportkosteneinsparungen zwischen einzelnen Szenarien</li> </ul>

## Scheduler: Greedy-Heuristik zur Abbildung der unterschiedlichen Koordinationsformen

- **Unilateral:**

Suche für jede Sendung im Sektor ihres Beladeortes nach Sendungen/Touren zur Konsolidierung, so dass die gesamten Transportkosten minimiert werden.

- **Bilateral:**

Zusätzlich zu unilateral: Suche für jede Sendung/Tour im Sektor ihres (letzten) Entladeortes nach Sendungen/Touren zur Kombination (=Bildung von Rundverkehren), so dass die gesamten Transportkosten minimiert werden.

- **Multilateral:**

Zusätzlich zu bilateral: Bei der Suche nach Konsolidierungs- und Kombinationspotenzialen werden jeweils alle Sektoren zwischen den Be- und Entladeorten zusätzlich miteinbezogen.

## Simulation: Datenkranz und Aufbau

### Input:

- 20.856 Sendungsdatensätze, 91% PTL, 9% FTL
- Beladeort und Entladeort in DE (PLZ), Sendungstermin, Gewicht
- 9 Mio. Sendungskilometer, 70 Mio. Tonnenkilometer (über alle Sendungen)
- Gesamttransportkosten ca. €7,7 Mio.

### Parameter:

- |                           |   |                           |
|---------------------------|---|---------------------------|
| • Sektorgröße:            | 3.600km <sup>2</sup> (100 Sektoren) – 360.000km <sup>2</sup> (1 Sektor) | Ausgangssit.: 30 Sektoren |
| • Koordinationsform:      | uni-, bi- und multilateral,   | Ausgangssit.: unilateral  |
| • Sendungsvolumen:        | zwischen 50 und 150%  | Ausgangssit.: 100%        |
| • Instanzen:              | jeweils eine Instanz pro Woche  |                           |
| • Kostensätze             |   |                           |
| – Fahrtkostensatz:        | 0,85-1,20 €/km (je nach Tourlänge)                                      |                           |
| – Mautkostensatz:         | 0,124 €/km  |                           |
| – Stoppkosten:            | 40,0 €/Stopp  |                           |
| – Ersparnis bei Rundtour: | 10%   |                           |



insgesamt 3.432 Szenarien

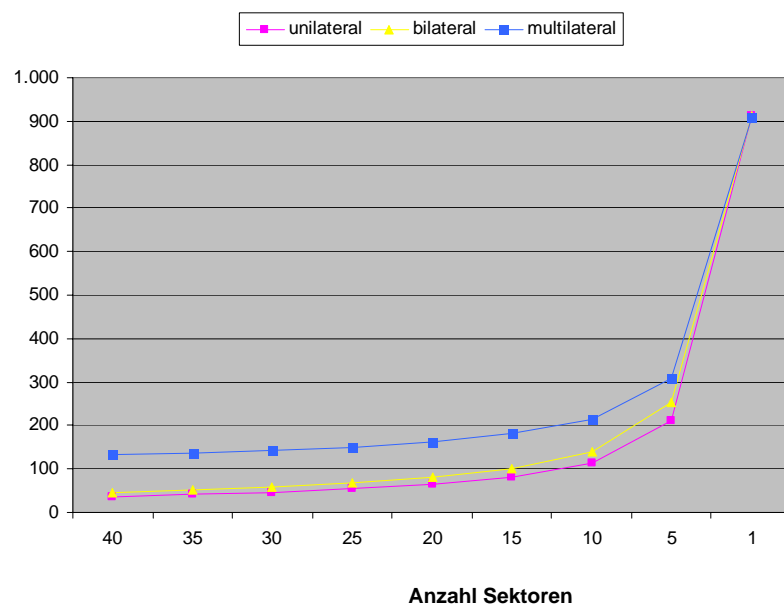
1. Ausgangssituation
2. Annahmen und Zielsetzungen
3. Modellaufbau und -ablauf
4. Ergebnisse

## Validierung von Hypothese 1)

H1: „Zunehmende Informationsverteilung schafft Potenziale zur Sendungskonsolidierung und Tourenkombination.“

### Analyseergebnis:

Ø-Anzahl Möglichkeiten  
zur  
Sendungskonsolidierung  
und Tourenkombination  
pro Sendung



## Validierung von Hypothese 2a)

**H2a: „Zunehmende Informationsverteilung verursacht eine Erhöhung des Koordinations- und Kommunikationsaufwands.“**

**Problem:** Für die Konsolidierung einer Sendung (Kombination einer Tour) kann ein Disponent jeweils nur sehr wenige (<10) Alternativen überprüfen.\*

\* Es wird hier davon ausgegangen, dass der Dispositionsprozess nicht vollständig automatisierbar ist. IT-Systeme dienen primär der Entscheidungsvorbereitung durch Verarbeitung „harter“ Informationen, wie geographischen Daten, Zeitfenstern und -punkten oder der Sendungsmenge (Gewicht, Lademeter, Volumen, Palettenstellplätze).

Ein Disponent hingegen kennt die Verlader in seinem Sektor und besitzt oftmals

- Erfahrungswerte über Abweichung zw. tatsächlicher und geplanter Sendungsmenge,
- Kenntnisse über die Einhaltung von Zeitfenstern beim Verloader,
- Verhandlungsspielraum hinsichtlich der Einhaltung von Zeitfenstern und
- Verhandlungsspielraum hinsichtlich der Preisgestaltung
- ...

**Lösung:** IT-System muss Entscheidungsprozess vorbereiten, indem es die Einsparpotenziale je Alternative berechnet.

**Folgerung:** **Mit zunehmender Anzahl an Alternativen erhöht sich tendenziell die Qualität der Lösung, nicht aber der Aufwand für die Disposition!**

## Validierung von Hypothese 2b)

**H2b: „Zunehmende Informationsverteilung verursacht eine Reduzierung des Sendungsvolumens.“**

Empirischen Beobachtungen zeigen:

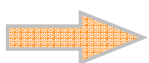
Zunehmende Zentralisierung (=Verringerung der Sektoranzahl) führt zu

1. Reduzierung der Nähe zum Kunden
2. Erhöhung des Standardisierungsgrads von Prozessen und Produkten (auch bedingt durch erhöhte Informationsverteilung)

→ Nicht alle Kunden wollen oder können auf geographische Nähe des Ansprechpartners verzichten und sich den Prozess- und Leistungsstandards des Dienstleisters anpassen.

→ Sendungsvolumen reduziert sich mit abnehmender Sektorzahl

Wie stark sich das Sendungsvolumen reduziert, hängt vom Kundenportfolio des Dienstleisters ab. Deshalb: Steuerung des Sendungsvolumens über einen Faktor k.

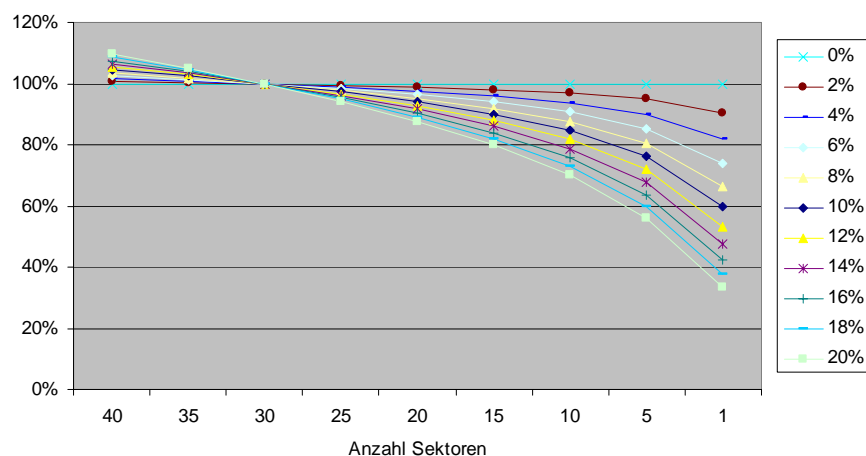


**Im Folgenden steht der Faktor k für den Anteil des Sendungsvolumens, der jeweils bei Halbierung der Sektorzahl verloren geht.**

## Einschub: Erläuterung zum k-Faktor

Bei Verdoppelung der Sektorgröße (=Halbierung der Sektoranzahl) wird das Sendungsvolumen um den Faktor  $k$  reduziert, damit der oben beschriebene Effekt simuliert werden kann.

Prozentuale Veränderung des Sendungsvolumens im Vergleich zur Ausgangssituation (30 Sektoren) in Abhängigkeit von  $k$



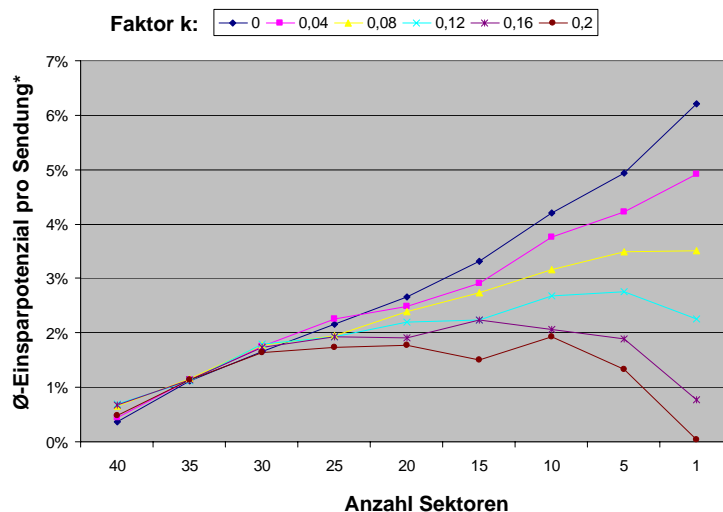
## Validierung von Hypothese 3 (I)

H3: „Es existiert ein optimaler Informationsverteilungsgrad (=effiziente Organisationsform) in Transportnetzwerken.“

## Analyseergebnis:

In Abhängigkeit von  $k$  weisen die Einsparpotenziale je Sektorzahl unterschiedliche Kurvenverläufe auf.

Somit lassen sich optimale Sektoranzahl und optimale Koordinationsform unabhängig von  $k$  nicht eindeutig ermitteln.



\* Mittelwert aller drei Koordinationsformen im Vergleich zu den Transportkosten in der Referenzsituation: unilateral, 30 Sektoren

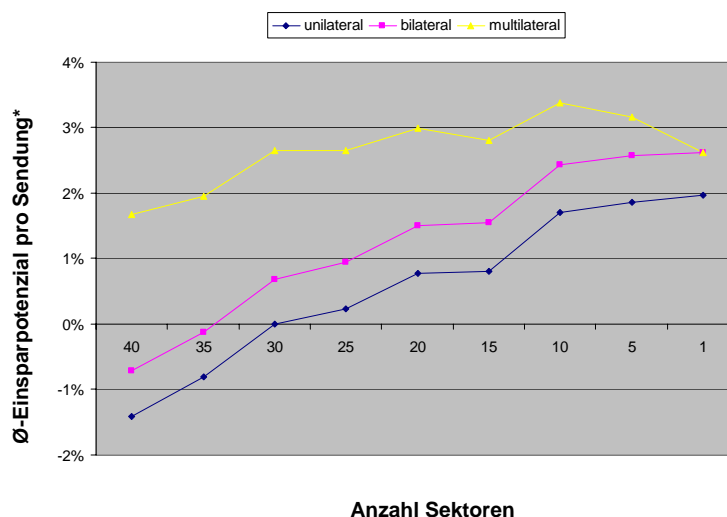
## Validierung von Hypothese 3 (II)

H3: „Es existiert ein optimaler Informationsverteilungsgrad (=effiziente Organisationsform) in Transportnetzwerken.“

## Analyseergebnis (für k=10%):

Der Nutzen beim Übergang zur multilateralen Koordination steigt mit zunehmender Sektorzahl.

Insgesamt erscheinen 10 Sektoren vorteilhaft, da bei einer weiteren Reduzierung kaum noch zusätzliche Einsparungen erzielt werden können.



\* im Vergleich zu den Transportkosten in der Referenzsituation: unilateral, 30 Sektoren

## Validierung von Hypothese 3 (III)

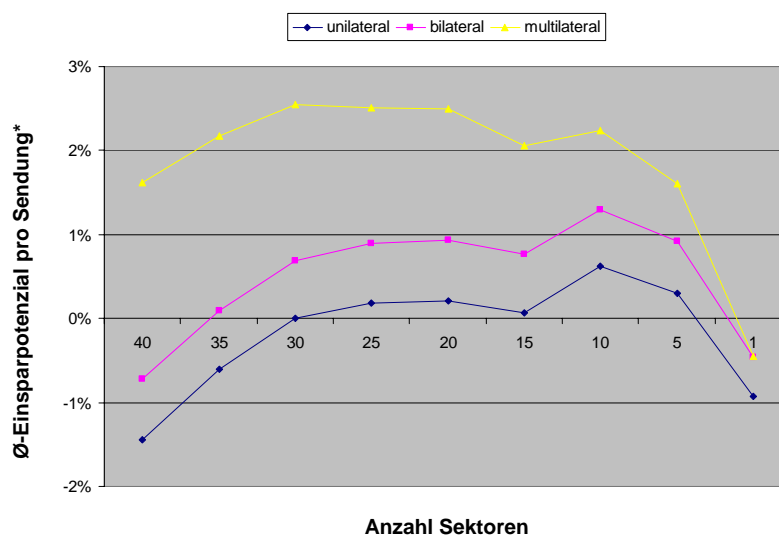
H3: „Es existiert ein optimaler Informationsverteilungsgrad (=effiziente Organisation) in Transportnetzwerken.“

## Analyseergebnis (für k=20%):

Die optimale Sektorzahl ist abhängig von der Koordinationsform.

Uni- und bilaterale Koordination:  
10 Sektoren

Multilaterale Koordination:  
20-30 Sektoren



\* im Vergleich zu den Transportkosten in der Referenzsituation: unilateral, 30 Sektoren

## Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse

Synergien in Ladungsverkehren hängen signifikant von der Informationsverteilung ab.

**Erfolgsfaktor 1**

Errichtung von Dispatchcentern mit vollständiger Informations-  
transparenz, um Leistungsfähigkeit der Regionen zu stärken

**Erfolgsfaktor 2**

Etablierung von Anreizmechanismen und Dispositionsregeln,  
um interne Kooperation zu unterstützen

**Erfolgsfaktor 3**

Verbesserung des Zusammenspiels zw. informations-verarbeitenden  
und informationsverteilenden Technologien

**Erfolgsfaktor 4**

Den durch Zentralisierung und Standardisierung bedingten Kunden-  
verlust reduzieren bzw. mit gezielter Kundenselektion kompensieren

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

[krause@wiso.uni-koeln.de](mailto:krause@wiso.uni-koeln.de)

# **Transportnetzgestaltung mit integriertem Flottenmanagement für Paketdienstleister**

**Prof. Dr. Knut Haase**

**Technische Universität Dresden**



# **Transportnetzgestaltung mit integriertem Flottenmanagement für Paketdienstleister**

Knut Haase

Technische Universität Dresden

GOR AG Verkehr und Logistik, 09.-10.03.2006, Bonn, Deutsche Post AG

1

## **Überblick**

1. Problemstellung
2. Transportkosten
3. Modell (p-Hub Median)
4. Lösungsansatz
5. Beispiel

2

## Problemstellung

### Prämissen

- Menge von Depots
- Teilmenge der Depots als potenzielle Hubs (Ausbaumöglichkeit)
- mehrere Transportfahrzeugtypen
- fahrzeugtyp- und relationsabhängige Transportkosten
- Anzahl zu errichtender Hubs gegeben
- jedes Depot genau einem Hub zuordnen
- Pakete durchlaufen maximal zwei Hubs
- Einrichtung eines Direktverkehrs  $\Rightarrow$  kein Aufsplitten in Direkt- und Netzverkehr

*Welche Depots sollen zu einen Hub ausgebaut werden?*

3

## Transportkosten

### Jahresleistung

Motorwagen: 120.000 km

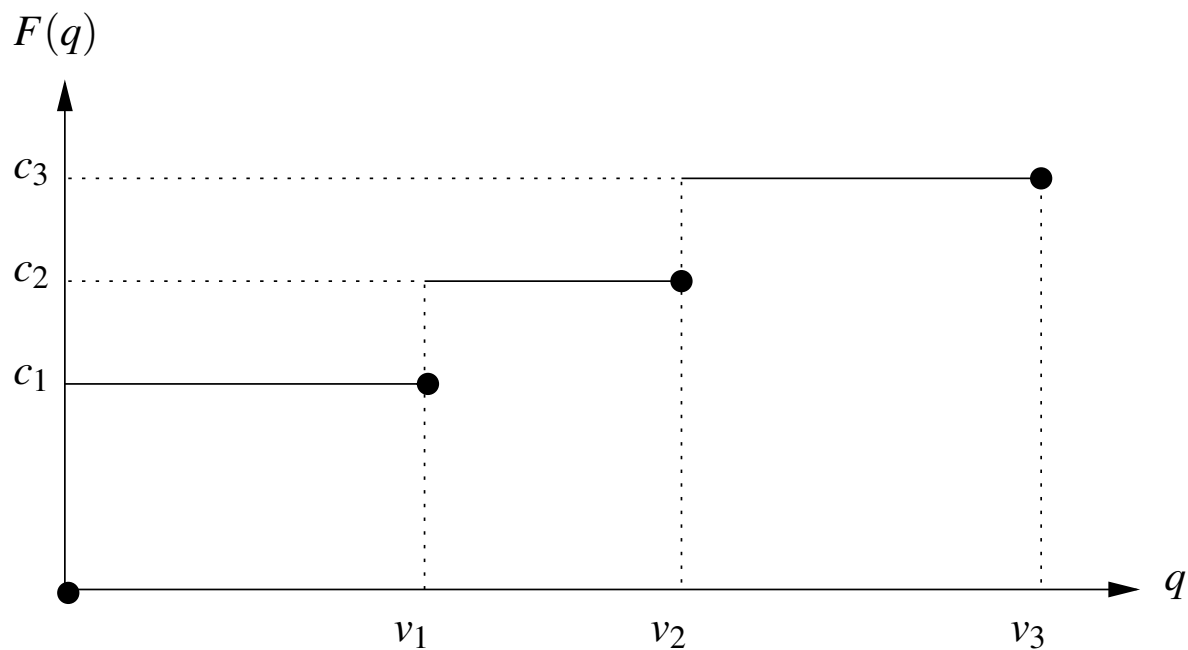
Anhänger: 80.000 km

### Vollkostenrechnung

Fahrzeugtyp	Kapazität [Pakete]	Kosten pro km [Euro]
Solofahrzeug (18 t)	450	1,04
Gliederzug (40 t)	900	1,16

Transportmenge  $\Rightarrow$  Fahrzeugtyp(en)

4



5

### Parameter

- $\kappa_m$  Kapazität eines Fahrzeuges vom Typ  $m$   
 $\gamma_m$  relationsbezogene Transportkosten eines Fahrzeuges vom Typ  $m$  (pro km)  
 $q$  vorgegebene Transportmenge

### Variablen

- $u_m$  Anzahl benötigter Fahrzeuge vom Typ  $m$

$$\min F = \sum_m \gamma_m u_m$$

$$\sum_m \kappa_m u_m \geq q$$

$$u_m \geq 0 \text{ und ganzzahlig} \quad \forall m$$

$\Rightarrow$  iteratives Verfahren; sukzessive Erhöhung von  $q$

6

maximale Transportmenge:  $\leq 50 \cdot 450$

$\Rightarrow q \in \{450 \cdot n \mid n = 1, \dots, 50\}$

GAMS/Cplex

$n$	Kapazität	Kosten pro km	Solofahrzeuge	Gliederzüge
1	450	1.04	1	0
2	900	1.16	0	1
3	1350	2.20	1	1
4	1800	2.32	0	2
5	2250	3.36	1	2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
10	4500	5.80	0	5
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
50	22500	29.00	0	25

7

## Modell (p-Hub Median Problem)

### Parameter

$p$	Anzahl Hubs
$q_{ij}$	täglich vom (Ausgangs)depot $i$ zum (Eingangs)depot $j$ zu befördernde Anzahl an Paketen
$c_{nhk}$	Kosten der Transportkapazität der $n$ -ten Stufe vom Hub $h$ zum Hub $k$
$\tilde{c}_{nih}$	Kosten der Transportkapazität der $n$ -ten Stufe vom Depot $i$ zum Hub $h$
$\bar{c}_{nhi}$	Kosten der Transportkapazität der $n$ -ten Stufe vom Hub $h$ zum Depot $i$
$\hat{c}_{ij}$	Kosten des Direktverkehrs vom Depot $i$ zum Depot $j$
$\tilde{v}_{nih}$	Transportkapazität der $n$ -ten Stufe vom Depot $i$ zum Hub $h$
$v_{nhk}$	Transportkapazität der $n$ -ten Stufe von Hub $h$ zum Hub $k$
$\bar{v}_{nhi}$	Transportkapazität der $n$ -ten Stufe vom Hub $h$ zum Depot $i$

8

**Variablen**

$y_h$	1, falls Hub $h$ errichtet wird (0, sonst)
$x_{ih}$	1, falls Depot $i$ dem Hub $h$ zugeordnet wird (0, sonst)
$\hat{w}_{ij}$	1, falls das Transportaufkommen vom Depot $i$ zum Depot $j$ im Direktverkehr abgewickelt wird (0, sonst)
$w_{ijhk}$	1, falls der Transport der von Depot $i$ nach Depot $j$ zu transportierenden Pakete zunächst vom Depot $i$ zum Hub $h$ , dann vom Hub $h$ zum Hub $k$ und schließlich vom Hub $k$ zum Depot $j$ erfolgt (0, sonst)
$z_{nhk}$	1, falls vom Hub $h$ zum Hub $k$ eine Transportkapazität der Stufe $n$ bereitzustellen ist (0, sonst)
$\tilde{z}_{nih}$	1, falls vom Depot $i$ zum Hub $h$ die Transportkapazität der $n$ -ten Stufe bereitzustellen ist (0, sonst).
$\bar{z}_{nhi}$	1, falls vom Hub $h$ zum Depot $i$ die Transportkapazität der $n$ -ten Stufe bereitzustellen ist (0, sonst).

9

$$\min F = \sum_{n,h,k} c_{nhk} z_{nhk} + \sum_{n,i,h} \tilde{c}_{nih} \tilde{z}_{nih} + \sum_{n,h,i} \bar{c}_{nhi} \bar{z}_{nhi} + \sum_{i,j} \hat{c}_{ij} \hat{w}_{ij}$$

$$\sum_h y_h = p$$

$$\sum_h x_{ih} = 1 \quad \forall i$$

$$x_{ih} - y_h \leq 0 \quad \forall i, h \mid i \neq h$$

$$x_{hh} - y_h = 0 \quad \forall h$$

$$x_{ih} + x_{jk} - w_{ijhk} - \hat{w}_{ij} \leq 1 \quad \forall i, j, h, k \mid i \neq j, h \neq k$$

$$\sum_j q_{ij} (x_{ih} - \hat{w}_{ij}) - \sum_n \tilde{v}_{nih} \tilde{z}_{nih} \leq 0 \quad \forall i, h$$

$$\sum_{i,j} q_{ij} w_{ijhk} - \sum_n v_{nhk} z_{nhk} \leq 0 \quad \forall h, k$$

$$\sum_j q_{ji} (x_{ih} - \hat{w}_{ji}) - \sum_n \bar{v}_{nhi} \bar{z}_{nhi} \leq 0 \quad \forall h, i$$

10

**Wertebereiche der Variablen**

$$\begin{array}{ll} y_h \geq 0 & \forall h \\ x_{ih} \in \{0, 1\} & \forall i, h \\ \hat{w}_{ij} \in \{0, 1\} & \forall i, j \\ w_{ijhk} \geq 0 & \forall i, j, h, k \\ \tilde{z}_{nih} \in \{0, 1\} & \forall n, i, h \\ z_{nhk} \in \{0, 1\} & \forall n, h, k \\ \bar{z}_{nhi} \in \{0, 1\} & \forall n, h, i \end{array}$$

$y_h, w_{ijhk}$  automatisch ganzzahlig

11

**Lösungsansatz**

- Schnittebenen
- Regelwerk zur Fixierung von Variablen

12

**Schnittebenen**

$e_{ij} = 1$ , falls die Depots  $i$  und  $j$  dem selben Hub zugeordnet werden ( $\leq 1$ , sonst),

$$\begin{aligned}
 \sum_n \tilde{z}_{nih} &= x_{ih} & \forall i, h \mid i \neq h \\
 \sum_n \tilde{z}_{nhi} &= x_{ih} & \forall h, i \mid h \neq i \\
 \sum_{nk} z_{nhk} &= y_h(p-1) & \forall h \\
 \sum_n z_{nhk} &\geq y_h + y_k - 1 & \forall h, k \mid h \neq k \\
 \sum_n z_{nhk} &\leq 0.5(y_h + y_k) & \forall h, k \mid h \neq k \\
 x_{ih} + x_{jh} - y_h &\leq e_{ij} & \forall i, j, h \mid i \neq j \\
 \sum_{j,h,k} w_{ijhk} &\leq |I| - 1 - \sum_j (\tilde{w}_{ij} + e_{ij}) & \forall i \\
 e_{ij} &\geq 0 & i, j
 \end{aligned}$$

13

**Regeln zur Fixierung von Variablen (Managementvorgaben)**

- Distanz von Depot  $i$  zum Hub  $h > D$  km  $\Rightarrow x_{ih} = 0$  (maximale Entfernung zum Hub)
- Paketmenge  $q_{ij} < Q \Rightarrow \hat{w}_{ij} = 0$  (kein Direktverkehr)
- Ordne Depot stets dem nächstgelegenen Hub zu  $\Rightarrow w_{ijhk} = 0$  falls nicht erfüllt
- Sei Depot  $i$  dem Hub  $h$  zugeordnet  $\Rightarrow$   
Transportmengen vom Depot  $i$  zum Hub  $h$  (Versand)

mindestens:  $\underline{Q}_{ih} = \sum_{j \mid q_{ij} < Q} q_{ij}$

höchstens:  $\overline{Q}_{ih} = \sum_j q_{ij}$

$$\Rightarrow \tilde{z}_{nih} = 0 \text{ falls } v_n \notin [\underline{Q}_{ih}, \overline{Q}_{ih}]$$

analog für den Empfang

$$\tilde{z}_{nhi} = 0 \text{ falls } v_n \notin [\underline{Q}_{hi}, \overline{Q}_{hi}]$$

14

## Beispiel

- 73 Depots
- 8 potenzielle Hubs
- Transportaufkommen in Deutschland: 160 Mio. Pakete pro Jahr
- $\alpha$  = Marktanteil
- 312 Werktage
- Transportaufkommen pro Tag:

$$Q = \frac{160 \cdot 10^6 \cdot \alpha}{312}$$

$$\alpha = 0.2 \Rightarrow Q = 102564$$

15



16



**Transportmengenmatrix**  $(q_{ij})$ 

- Versand und Empfang proportional zur Einwohnerzahl ( $E_i$ )

$$\beta_i = Q \cdot \frac{E_i}{\sum_j E_j}$$

$$q_{ij} = \beta_i \cdot \frac{E_j}{\sum_{i'} E_{i'}}$$

z.B.

$$Q = 400, E_1 = 25.000, E_2 = 30.000, E_3 = 45.000$$

$$\beta_1 = 400 \cdot \frac{25.000}{25.000 + 30.000 + 45.000} = 400 \cdot \frac{1}{4} = 100 \quad \beta_2 = 120 \quad \beta_3 = 180$$

$$(q_{ij}) = \begin{pmatrix} 25 & 30 & 45 \\ 30 & 36 & 54 \\ 45 & 54 & 81 \end{pmatrix}$$

17

**Wirkung der Schnittebenen**

$$\sum_n \tilde{z}_{nih} = x_{ih} \quad \forall i, h \mid i \neq h \quad (1)$$

$$\sum_n \bar{z}_{nhi} = x_{ih} \quad \forall h, i \mid h \neq i \quad (2)$$

$$\sum_{nk} z_{nhk} = y_h(p-1) \quad \forall h \quad (3)$$

$$\sum_n z_{nhk} \geq y_h + y_k - 1 \quad \forall h, k \mid h \neq k \quad (4)$$

$$\sum_n z_{nhk} \leq 0.5(y_h + y_k) \quad \forall h, k \mid h \neq k \quad (5)$$

$$x_{ih} + x_{jh} - y_h \leq e_{ij} \quad \forall i, j, h \mid i \neq j \quad (6)$$

$$\sum_{j,h,k} w_{ijhk} \leq |I| - 1 - \sum_j (\tilde{w}_{ij} + e_{ij}) \quad \forall i \quad (7)$$

$$e_{ij} \geq 0 \quad i, j \quad (8)$$

18

$$\alpha = 0,25 \quad p = 4$$

Schnittebene(n)	Zielfunktionswert der LP-Relaxation
keine	62353,78
1	65205,75
2	65319,44
3	62353,78
4	62353,78
5	62353,78
6-8	62485,95
1-2	68160,26
1-3	68160,26
1-4	68160,26
1-5	69288,26
1-8	69398,62

19

### Ausgewählte Ergebnisse

( GAMS/Cplex, max. CPU-Time 3600 Sek., Lösungsgüte  $\leq 3\%$ )

Markt- anteil	Anzahl Hubs	Zielfunk- tionswert	Hub-Standorte	Lösungs- güte
$\alpha = 0,20$	$p = 4$	86041,32	Frankfurt, Hannover, Nürnberg, Düsseldorf	2,29%
$\alpha = 0,25$	$p = 4$	101439,20	Frankfurt, Hannover, Nürnberg, Berlin	2,62%
$\alpha = 0,30$	$p = 4$	119605,04	Frankfurt, Hannover, Nürnberg, Düsseldorf	2,66%
$\alpha = 0,25$	$p = 3$	108453,44	Köln, Hannover, Nürnberg	2,00%
$\alpha = 0,25$	$p = 5$	97286,56	Frankfurt, Hannover, Nürnberg, Berlin, Düsseldorf	4,85%

20

Auswirkungen von Unterschätzung des Marktanteils?

$$\alpha = 0,20 \quad p = 4$$

⇒ Standorte (Frankfurt, Hannover, Nürnberg, Düsseldorf)

tatsächlicher Marktanteil 25%

Fixierung der Standorte und Lösung des verbleibenden Problems bei Lösungsgüte von 0 %

$$F = 101316,60 < 101439,20 \quad (\text{vorher bei Lösungsgüte von 2,63\%})$$

⇒ robuste Lösung

21

### Graphische Veranschaulichung

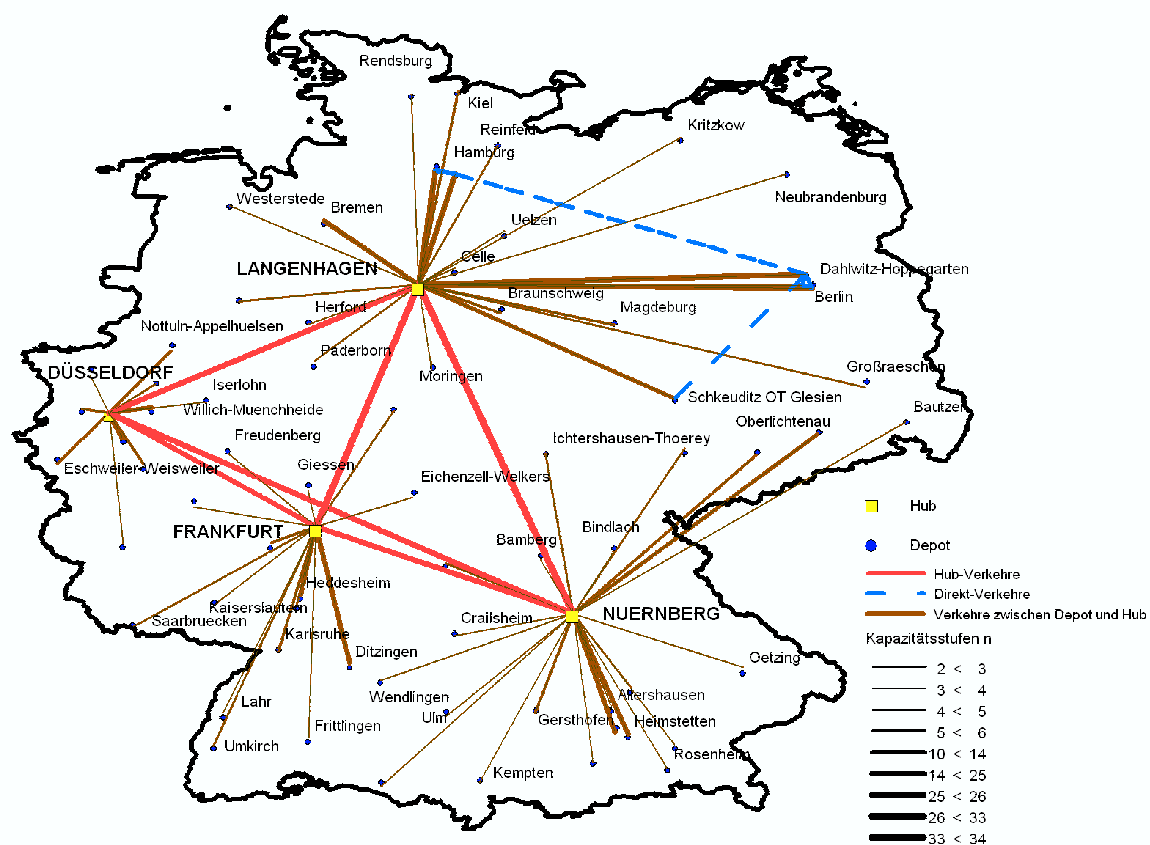
$$\alpha = 0,30 \quad p = 4$$

Fixierung der Standorte gemäß der Lösung mit Lösungsgüte von 2,66%

Lösung des verbleibenden Problems bei Lösungsgüte von 0 %

$$F = 118776,08 < 119605,04 \quad (\text{vorheriger Zielfunktionswert})$$

22



# **Tourenplanung: Herausforderungen für die Theorie aus der Praxis**

**Dr. Tore Grünert**

**GTS Systems and Consulting GmbH  
Herzogenrath**

## GTS Systems and Consulting GmbH

### Tourenplanung: Herausforderungen für die Theorie aus der Praxis

Dr. Tore Grünert

gruenert@gts-systems.de



Partner in optimising your logistics network

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)



1

## Agenda

- Kurzvorstellung GTS Systems & Consulting GmbH
- Motivation
- Herausforderungen
- Fazit

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)



2

## Kurzdarstellung der GTS Systems and Consulting GmbH

### Unternehmensziel

- Unterstützung der Klienten, um **bessere Entscheidungen** zu treffen, wobei quantitative Methoden wie Optimierung, Simulation und Prognoseverfahren eingesetzt werden
- Einsatz neuester IT- und Operations-Research-Technologien



10.03.2006

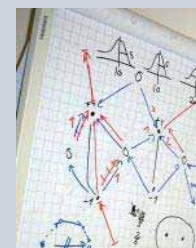
>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)**gts** systems & consulting

3

## Kurzdarstellung der GTS Systems and Consulting GmbH

### Tätigkeitsfeld Beratung

- Unternehmensrealitäten erfassen: langjährige Erfahrung mit der **Analyse** und **Optimierung** komplexer Geschäftsprozesse, insbesondere im KEP- und Post-Bereich
- **Entwurf von** mathematischen Beschreibungs- und Optimierungs**modellen** sowie von **Algorithmen** für das Management von Logistikprozessen  
Stichworte: **Kennzahlen, Optimierung, Simulation, Prognose**



10.03.2006

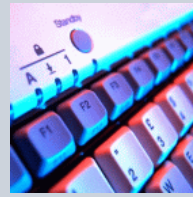
>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)**gts** systems & consulting

4

## Kurzdarstellung der GTS Systems and Consulting GmbH

### Tätigkeitsfeld Entwicklung

- Implementierung von kundenindividuell angepasste Software zur Lösung von wiederkehrenden Problemen der Planung und Disposition: Komplexe **Optimierungs-, Planungs- und Dispositionssysteme**
- Fundiertes IT-Know-how auf den Gebieten des Datenbankmanagements, der Kommunikation, der Anwendungserstellung und der Visualisierung mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen



10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

5

### Agenda

- Kurzvorstellung GTS Systems & Consulting GmbH
- Motivation
- Herausforderungen
- Fazit

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

6



## Motivation

- „Academic research tends to drive new OR technologies. In information systems, companies set most of the research agendas and academics follow what is happening in practice, the reverse of OR.“

Frederic H. Murphy,  
Interfaces 35, 2005



Rune Mields, Der Elfenbeinturm in Zahlen versinkend, 2001, Aquatec auf Leinwand

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

**gts** systems & consulting

7

## Motivation: Vehicle Routing and Scheduling: Theorie

- Seit den fünfziger Jahren wurden mehr als 1.000 wissenschaftliche Beiträge veröffentlicht
- Die meisten befassen sich mit "Standardproblemen":
  - TSP, VRP, pickup & delivery, heterogeneous fleet VRP, multi-depot VRP, period VRP, backhaul VRP, ...
- Seit den achtziger Jahren werden vermehrt Probleme mit Zeitfenstern, Präzedenz-Relationen und anderen Restriktionen untersucht.
- Nur kleine Instanzen können exakt gelöst werden (Ausnahme: 'reine' TSP), typischerweise ist  $n < 50-100$
- Größere Instanzen werden mit Heuristiken und Metaheuristiken gelöst

10.03.2006

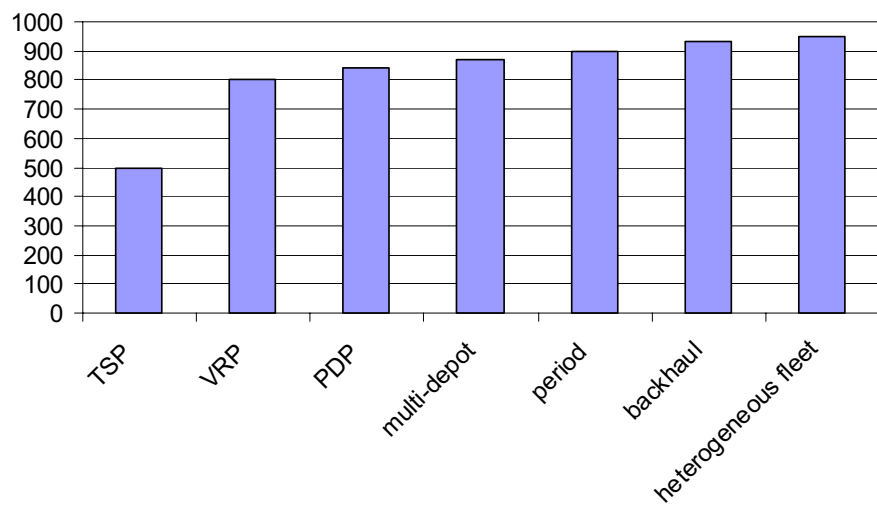
>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

**gts** systems & consulting

8

## Motivation: "ABC-Analyse"

Anzahl Veröffentlichungen (grob)



Problem-  
klasse

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

**gts** systems & consulting

9

## Motivation: Literatur

- Es gibt einen Trend, komplexere Probleme zu untersuchen:
- "A {variant of} {TS, SA, GA, Ant} Algorithm for the ..."
  - VRP with time windows
  - multi-depot VRP with time windows
  - multi-depot VRP with heterogeneous fleet and time windows
  - period VRP with time windows...
- Allgemeinere Ansätze: „Rich VRP“, Constraint Programming, Generische Algorithmen
- Die meisten bisher publizierten Metaheuristiken haben Schwierigkeiten mit Instanzen, die mehr als  $n=200-500$  Aufträge aufweisen
- Starke Fokussierung auf Benchmarks (Solomon, ...)

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

**gts** systems & consulting

10

## Motivation: Qualität (Kosten, Zulässigkeit)

Qualität der Lösung



Unterschätze den Disponenten nicht!  
Eine Kostenverbesserung von 15-20% gegenüber einer manuell erstellten Lösung ist nur erreichbar, wenn diese sehr schlecht ist! (meist organisatorisches Problem)

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

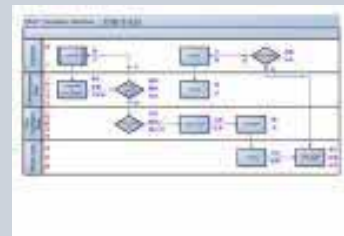
**gts** systems & consulting

11

## Motivation: Workflow der Tourenplanung

Tourenplanung ist viel mehr als Optimierung!

- Man benötigt IT-Unterstützung für den **gesamten Prozess / Workflow**:
  - Auftragserfassung
  - Auftragsprüfung
  - Tourenplanung
  - Beauftragung
  - Bestätigung
  - Änderung
  - Ist-Erfassung
  - Kennzahlenermittlung, ...
- Planungsparadigma:
  - **vollautomatisches** System
  - interaktives halbautomatisches System



10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

**gts** systems & consulting

12

## Agenda

- Kurzvorstellung GTS Systems & Consulting GmbH
- Motivation
- Herausforderungen
- Fazit

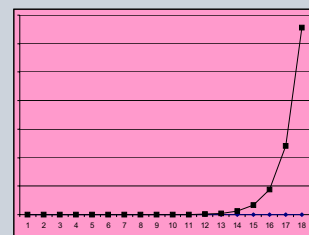
10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

13

## Herausforderung 1: Größe

- Praktische Problemstellungen sind meistens groß
- Instanzen mit mehr als 5000 Aufträgen (nach „organisatorischer Dekomposition“) sind üblich
- Offen: Gibt es eine **vernünftige** Dekomposition von Pickup-and-Delivery-Aufträgen?
- Offen: Wie berechnet man effizient möglichst genaue Distanzmatrizen (Strecke, Zeit, Maut), inkl. tageszeitabhängigen Geschwindigkeiten?



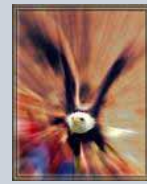
10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

14

## Herausforderung 2: Dynamik

- Aufträge kommen dynamisch in das System, bestehende Aufträge werden geändert und storniert.
- Ausnahme: Regelnetze, wie z. B. im Bereich der Briefpost oder für bestimmte Hauptlauftransporte
- Herausforderung ist die **dynamische Optimierung**:
  - Rechenzeit ist bei sehr großen Instanzen begrenzt (Sekunden bis Minuten für eine Reaktion)
  - (nicht-formale) Kenntnis der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Aufträge
  - Generierung von flexiblen Plänen
  - Wahl eines geeigneten Planungshorizonts; was wird darin berücksichtigt?



10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

15

## Herausforderung 3: Intermodalität

- Es werden unterschiedliche Transportmittel eingesetzt:
  - kombinierter Transport (Straße-Schiene, Luft-Straße, Straße-Schiene-Wasser)
- Manchmal ist die Wahl des Transportmittels ein Optimierungsproblem, wobei die Auslastung eines „Fixkosten-Transportmittels“ (z. B. Flugzeug oder Zug) ein wichtiger Aspekt ist
- Die Koordination des Umschlagprozesses zwischen den Transportmitteln ist schwierig



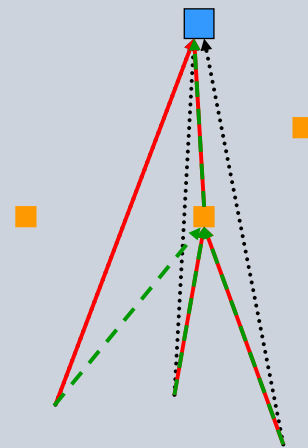
10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

16

## Herausforderung 4: Zerlegung von Aufträgen

- In vielen Fällen ist es möglich, Aufträge in Teilaufträge zu zerlegen, um eine Konsolidierung zu erreichen.
- Beispiele:
  - (dynamische) Hub-Bildung
  - Satelliten-Depots
  - Begegnungsverkehre
- Herausforderung: Modelle und Algorithmen, die eine automatische Zerlegung unterstützen (Zeit- und Raum-Aspekte!)



10.03.2006

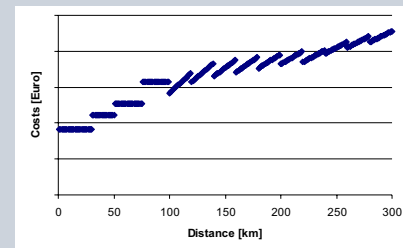
>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

gts systems &amp; consulting

17

## Herausforderung 5: Modellierung von Kosten

- In mehr als 98% aller wissenschaftlichen Arbeiten wird mit linearen Kostenfunktionen gearbeitet, die von einem Parameter (Zeit, Strecke) abhängen
- In der Praxis hängen die Kosten von einer Vielzahl von Parametern ab, z. B.:
  - Strecke
  - Zeit
  - Relation (Start, Ziel)
  - Fahrzeugtyp
  - transportierte Menge
  - Transportdienstleister
- Typisch sind nichtlineare Kostenverläufe (z. B. Degression)
- Manchmal können die Kosten nur geschätzt werden (z. B. Nachtflugnetz)



10.03.2006

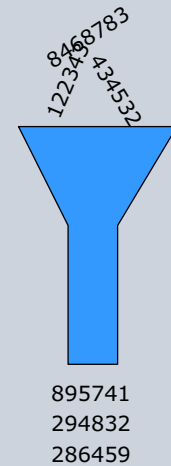
>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

gts systems &amp; consulting

18

## Herausforderung 6: Umgang mit Unzulässigkeit

- Nahezu alle Modelle gehen davon aus, dass der zulässige Bereich eindeutig definiert ist.
- In der Praxis kommt es ständig zur Verletzung von Restriktionen, z. B.:
  - Zeitfenster („soft time windows“ wurden untersucht)
  - Kapazitäten (sind z. B. Lademeter additiv?)
  - Ressourcen (es fehlen z. B. Fahrzeuge, was tut man?)
  - Aufträge werden erst durch Kombination zulässig (z. B. wegen maximaler Wartezeit)
  - Vorgegebene Bestände an Ladehilfsmitteln können nicht eingehalten werden



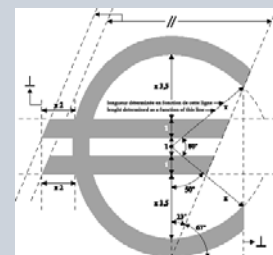
10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

19

## Herausforderung 7: Bewertung von Lösungen

- Trade-off zwischen Zulässigkeit und Kosten ist im Allgemeinen nicht spezifiziert
- Wunsch nach Lower-Bounds nur teilweise erfüllbar (Column-Generation, Lagrange)
- Bewertung von dynamischen Systemen schwierig; welcher Informationsstand lag vor?
- Orientierung an Average-Case / Worst-Case bzw. Robustheit
- Algorithmisch gibt einen Trade-Off zwischen Allgemeinheit und Qualität



10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)

20

## Herausforderung 8: Multiple Ressourcen

- In der Praxis müssen multiple mobile Ressourcen gemanagt werden:
  - Zugmaschine → Umlaufplanung
  - Anhänger, Sattelaufleger, Container / Wechselbrücken → Ausgleichsproblem
  - Fahrer → Umlaufplanung
  - Ladehilfsmittel (Briefbehälter, Rollbehälterwagen, ...) → Ausgleichsproblem
- Ressourcen können im Laufe des Planungshorizonts mehrfach eingesetzt werden
- Es gibt eine Interaktion zwischen mobilen und stationären Ressourcen (z. B. „Solleingangskurve“, Rampen / Tore)



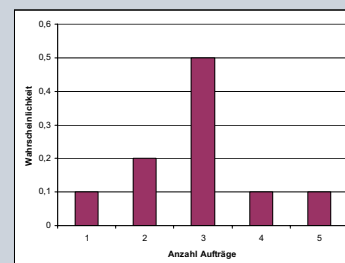
10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)**gts** systems & consulting

21

## Herausforderung 9: Prognoseverfahren für den Transport

- Prognoseverfahren sind insbesondere dann wichtig, wenn der Zustand einer Ressource zum Ende eines Plans über die Qualität des nächsten Plans mit entscheidet
- Beispiele:
  - Fahrzeugumläufe
  - Fahrerumläufe
  - Repositionierung von Ladehilfsmitteln
- Das Rechnen mit Mittelwerten kann zu sehr schlechten Ergebnissen führen (Upside- / Downside-Risks)
- Tendenziell gibt es eine starke Saisonalität (Woche, Jahr, Feiertage)



10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)**gts** systems & consulting

22



## Herausforderung 10: Flexible Integration von Restriktionen

- In der Praxis gibt es eine Vielzahl von Restriktionen, die in der wissenschaftlichen Literatur bisher wenig oder kaum beachtet wurden, z. B.:
  - Lenk- und Ruhezeiten
  - Mehrfache Zeitfenster („Öffnungszeiten“)
  - Tageszeitabhängige Geschwindigkeiten
  - LIFO-Beladung
  - Anhänger, die abgestellt werden können
  - Begegnungsverkehre
  - Maut
  - „gerechte, vertragliche geregelte Vergabe“ von Touren an verschiedene Dienstleister
  - Berücksichtigung von Rundtouren, Rückehrtouren, Tramptouren und Begegnungstouren

$$\begin{aligned}
 z_{31} &= \min \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k & (1) \\
 \text{s.t.} & \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in \Delta^+(i)} x_{ij}^k = 1 \quad \text{für alle } i \in N & (2) \\
 \sum_{(i,j) \in A} q_i x_{ij}^k &\leq Q^k \quad \text{für alle } k = 1, \dots, K & (3) \\
 \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij}^k &= 1 \quad \text{für alle } k = 1, \dots, K & (4) \\
 \sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ij}^k - \sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{ji}^k &= 0 \quad \text{für alle } k = 1, \dots, K, j \in N & (5) \\
 \sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ij}^k &= 1 \quad \text{für alle } k = 1, \dots, K & (6) \\
 u_i^k - u_j^k + Q^k x_{ij}^k &\leq Q^k - q_j \quad \text{für alle } k = 1, \dots, K, (i,j) \in A & (7) \\
 q_i &\leq u_i^k \leq Q^k \quad \text{für alle } k = 1, \dots, K, i \in V & (8) \\
 x_{ij}^k &\in \{0, 1\} \quad \text{für alle } k = 1, \dots, K, (i,j) \in A & (9)
 \end{aligned}$$

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)


23

## Agenda

- Kurzvorstellung GTS Systems & Consulting GmbH
- Motivation
- Herausforderungen
- Fazit

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)


24

## Fazit und Ausblick

- Es gibt heute sehr leistungsfähige Algorithmen für Standardprobleme der Tourenplanung
- Durch verschiedene Ansätze wird eine Flexibilisierung angestrebt, wobei dies nur teilweise erfolgreich ist
- Viele der hier aufgeführten Probleme sind bisher kaum oder gar nicht wissenschaftlich untersucht worden
- Will man für komplexere Probleme angemessene Ergebnisse erzielen (Qualität & Laufzeit), ist weiterhin die Entwicklung von angepassten Modellen und Algorithmen notwendig
- Ausblick: Trend zur Automatisierung von dispositiven Aufgaben wird sich verstärken (weg von den manuellen und interaktiven Systemen)

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)**gts** systems & consulting

25

## Ein kleiner Werbespot zum Schluss...



10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)**gts** systems & consulting

26

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



Partner in optimising your logistics network

Kontakt: [gruenert@gts-systems.de](mailto:gruenert@gts-systems.de)

10.03.2006

>> [www.gts-systems.com](http://www.gts-systems.com)



27

# **Tourenplanung in der Praxis**

**Dr. Jens Gottlieb**

**SAP AG  
Walldorf**

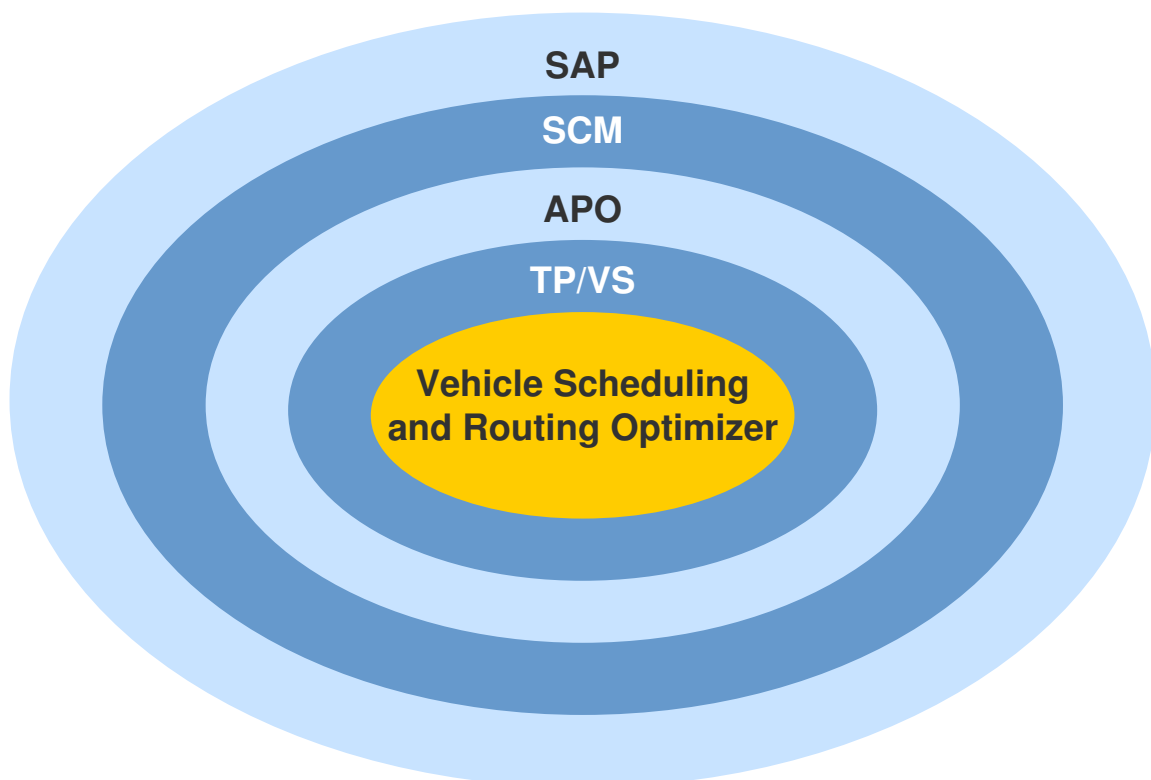
# Tourenplanung in der Praxis

**Jens Gottlieb**  
**SAP AG, Walldorf**

**jens.gottlieb@sap.com**

THE BEST-RUN BUSINESSES RUN SAP 

## SAP und Tourenplanung?



## Agenda



### Ein Problem aus der Praxis



### Das Lösungsverfahren

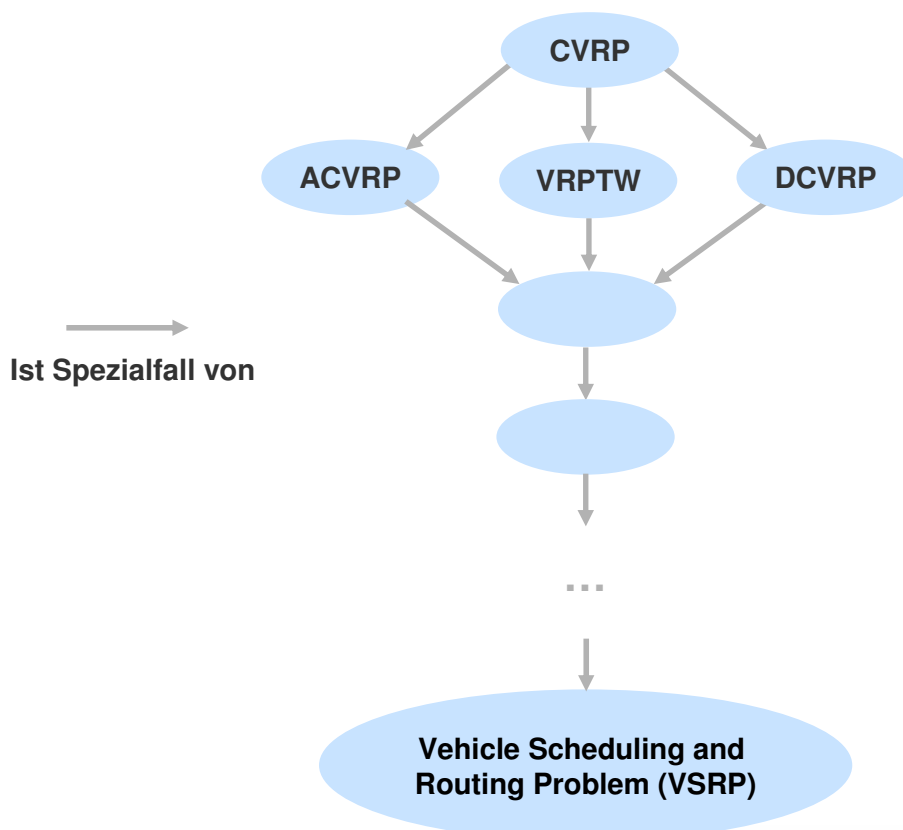


### Einsatz



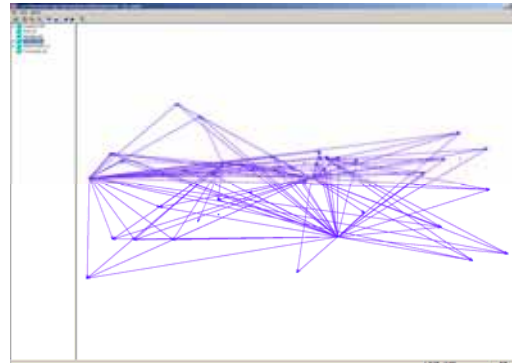
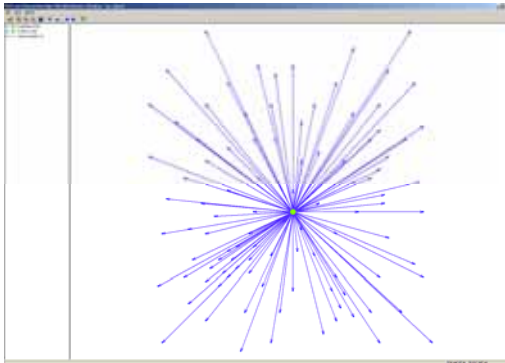
### Fazit

## Vom CVRP zu einem Problem aus der Praxis



## Problembeschreibung (1): Aufträge

- Auftragsbasiertes Modell
- Quell- und Ziellokation pro Auftrag



- Priorität (Nichtlieferungskosten)
- Beladungsdimensionen (Gewicht, Volumen, ...)
- Charakteristiken (Gefahrgut, Tiefkühlware, ...)
- Be- und Entladedauern (abhängig vom Fahrzeug)

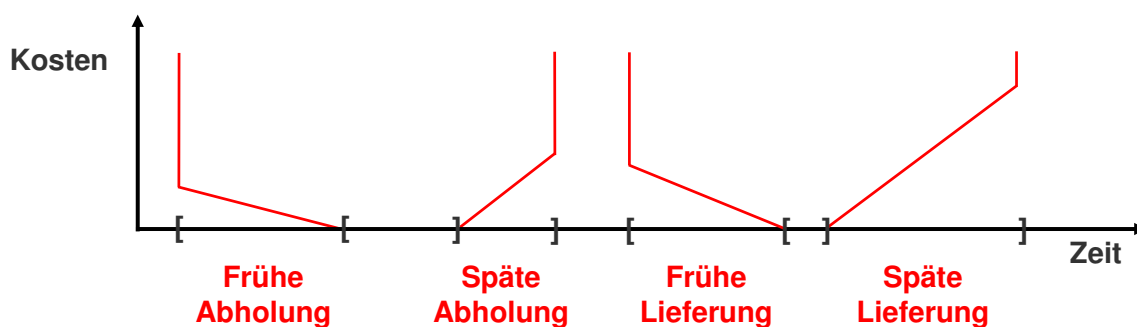
© SAP AG 2006, Tourenplanung in der Praxis, Jens Gottlieb 5

THE BEST-RUN BUSINESSES RUN SAP



## Problembeschreibung (2): Zeitliche Restriktionen

- Zeitfenster je Auftrag (hart und soft)



- Beladen benötigt Ressource an der Quell-Lokation
  - Öffnungszeiten
  - Kapazitäten
- Entladen benötigt Ressource an der Ziel-Lokation
  - Öffnungszeiten
  - Kapazitäten

© SAP AG 2006, Tourenplanung in der Praxis, Jens Gottlieb 6

THE BEST-RUN BUSINESSES RUN SAP



## Problembeschreibung (3): Fahrzeuge

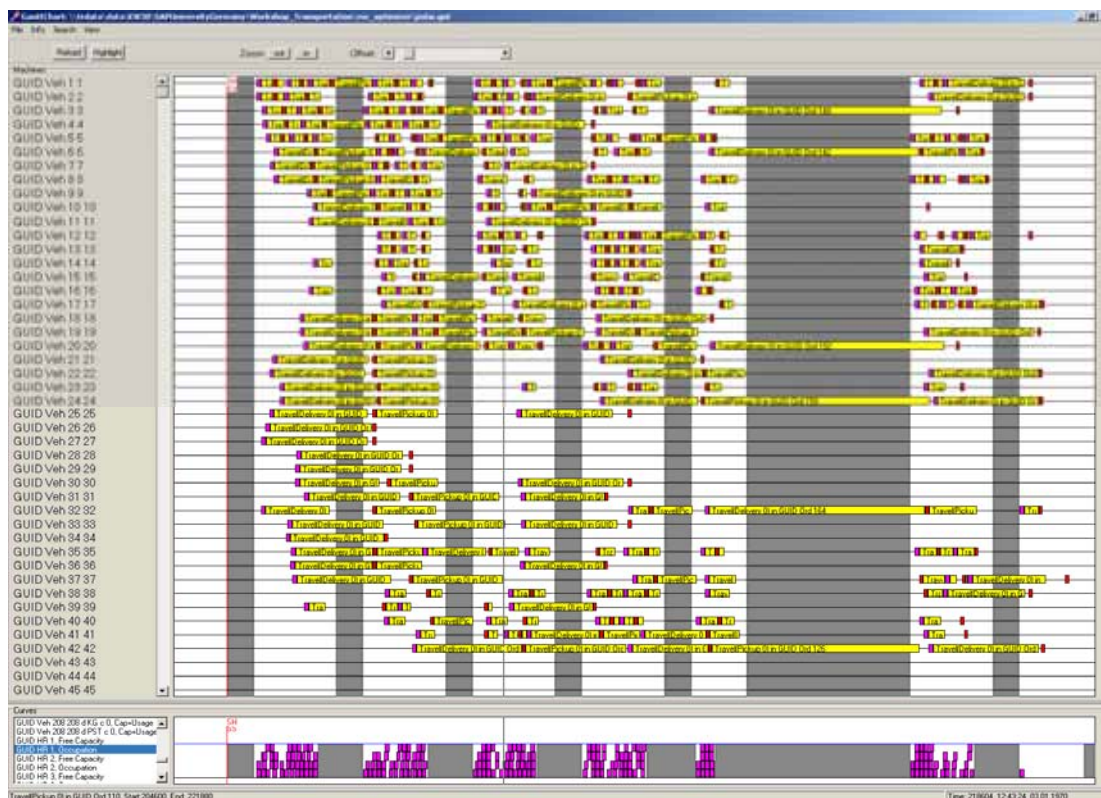
- Fahreigenschaften (Dauer, Distanz, ...)
- Charakteristiken (gekühlt, geeignet für Gefahrgut, ...)
- Pausenkalender
- Beschränkungen:
  - Startlokation und Endlokation
  - Einsatzdauer
  - Gesamtdistanz
  - Anzahl Stopps
  - Beladung (Gewicht, Volumen, ...)
- Kosten:
  - Fixkosten
  - Einsatzdauer
  - Gesamtdistanz
  - Anzahl Stopps
  - Mengenkosten (Distanz x Ladung)

© SAP AG 2006, Tourenplanung in der Praxis, Jens Gottlieb 7

THE BEST-RUN BUSINESSES RUN SAP



## Beispiel: Lösung eines ausgewählten Kundenszenarios



© SAP AG 2006, Tourenplanung in der Praxis, Jens Gottlieb 8

THE BEST-RUN BUSINESSES RUN SAP

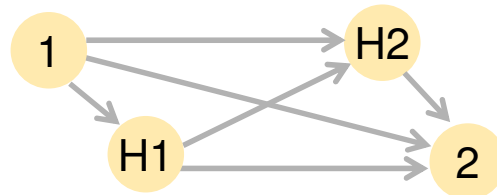




## Problembeschreibung (4): Hubs etc.

### ■ Hubs (Umladelokationen)

- Indirekte Lieferung über Hub oder direkte Lieferung
- Minimale und maximale Warenverweildauer an Hub

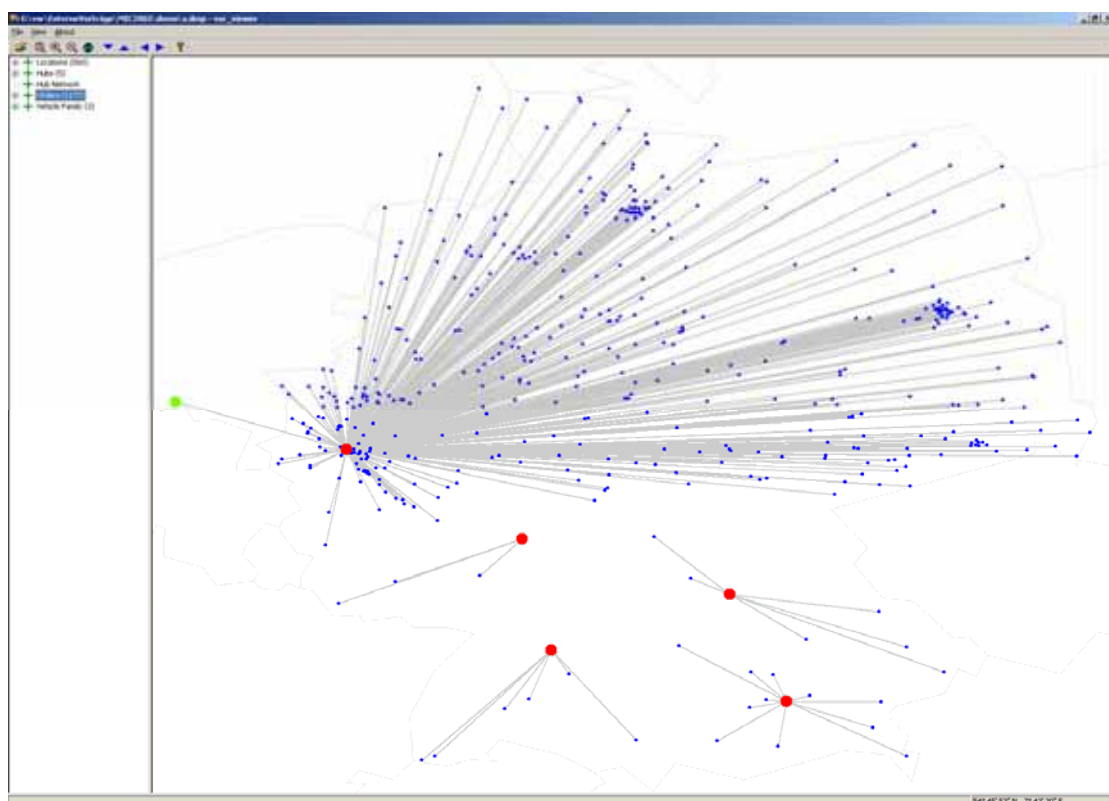


### ■ Inkompatibilitäten

- Zwischen Aufträgen
- Zwischen Fahrzeugen und Aufträgen
- Zwischen Aufträgen und Umladelokationen
- Zwischen Fahrzeugen und Umladelokationen

### ■ Fahrpläne: Route und Zeiten sind fixiert

## Beispiel: Ausgewähltes Kundenszenario mit Hubs



## Problembeschreibung (5): Zusammenfassung

**Ziel:** Finde Transportplan, der Gesamtkosten minimiert und alle Randbedingungen erfüllt

**Entscheidungen des Transportplans:**

- Je Auftrag: Ausführen oder nicht?
- Je ausgeführtem Auftrag: Wähle Abschnitte aus Hubnetzwerk
- Je ausgewähltem Abschnitt: Wähle Fahrzeug
- Je Fahrzeug:
  - Bestimme relative Reihenfolge der Aktivitäten (Routing)
  - Bestimme Startzeiten für die Aktivitäten (Scheduling)

**Gesamtkosten = gewichtete Summe von Kosten je**

- Auftrag (Nichtlieferung, Verfrühung, Verspätung) und
- Fahrzeug (Fix, Dauer, Distanz, Anzahl Stopps, Mengenkosten)

## Agenda



**Ein Problem aus der Praxis**



**Das Lösungsverfahren**



**Einsatz**



**Fazit**

## Das Lösungsverfahren

### Evolutionäre lokale Suche

- Direkte Lösungsrepräsentation
- Nur zulässige Lösungen
- Kleine Population
- Initialisierung: Greedy Insertion + lokale Optimierung
- Variation
  - Viele spezialisierte atomare Move-Operatoren (2-opt, Or-opt, ...)
  - Orchestrierung der atomaren Moves
  - Lokale Optimierung
- Preprocessing
- Postprocessing

## Agenda



### Ein Problem aus der Praxis



### Das Lösungsverfahren



### Einsatz



### Fazit

## Einsatz

- **Selektion des Planungsproblems**
- **Verschiedene Einsatz-Szenarien**
  - Batch oder interaktiver Start
  - Lange Läufe über Nacht oder kurze Läufe tagsüber
  - Komplette Neuplanung oder inkrementelle Planung
  - Planungshorizont 1 Tag oder mehrere Wochen
- **Laufzeit-Limits von wenigen Sekunden bis mehrere Stunden**
- **Transportplaner verarbeitet das Ergebnis:**
  - Prüfung,
  - Manuelle Änderung, falls nötig, und
  - Freigabe in das Transportation Execution System
- **Nebeneffekt des Optimierers: Überprüfung der Eingabedaten**
  - Unerwartete Ergebnisse deuten meist auf unsaubere Daten hin

## Kennzahlen ausgewählter Kundenszenarien

Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aufträge	75	255	662	778	804	1177	2029	7040	13569
Beladungsdimensionen	1	1	2	1	3	2	5	4	3
Lokationen	30	199	55	8	32	565	128	1873	14
Hubs	9					5			
Quellen	9	5	11	1	1	1	1	1	1
Ziele	14	194	46	7	31	559	127	1872	13
Fahrzeugtypen	4	38	9		7	3	10	10	2
Fahrzeuge	58	93	301		281	680	2701	2011	100
Fahrplanfahrzeugtypen	1			6					
Fahrplanfahrzeuge	38			11					
Öffnungszeiten (Be-/Entladen)	2	196				1	29	64	
Kapazitäten (Be-/Entladen)			54		32				

## Agenda



### Ein Problem aus der Praxis



### Das Lösungsverfahren



### Einsatz



### Fazit

## Fazit

### Zusammenfassung:

- Probleme in der Praxis sind komplex
- Sehr heterogene Instanzen desselben abstrakten Problems
- Ein Algorithmus für das abstrakte Problem, anwendbar auf beliebige Ausprägungen in konkreten Kundenszenarien
- Algorithmus: lokale Optimierung, Metaheuristiken

### Ausblick:

- Grid Computing
- Erweiterung des abstrakten Problems

# **Optimierungslösungen für die Planung von Transportnetzen**

**Dr. Hermann Stolle**

**ILOG Deutschland GmbH  
Bad Homburg**



**Dr. Hermann Stolle**

**[hstolle@ilog.de](mailto:hstolle@ilog.de), +49-6172-406094**

# Optimierungslösungen für die Planung von Transportnetzen

## ILOG Mission



**Wir helfen unseren Kunden  
mit Software und Dienstleistungen  
bessere Entscheidungen schneller zu  
treffen,  
**Komplexität zu beherrschen** und  
Änderungs-Anforderungen zu erfüllen.**

# Agenda



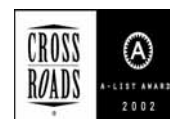
- **Komplexität in der Transport-Planung für reale Probleme**
- **Projekt-Beispiel: Frequenzplanung**

## Über ILOG



### “Changing the rules of business”

- **Gehört zu den Top 200 Software-Unternehmen**
  - Gegründet in 1987
  - AG (NASDAQ, Euronext u. a.)
  - Über 700 Angestellte weltweit
  - 125 Mio\$ Umsatz in FY 2005
  - Niederlassungen und direkte Betreuung in mehr als 30 Ländern
- **Spitzenposition in Optimierung, Geschäftsregeln und Visualisierung**
  - Über 2500 direkte Kunden
  - Über 200 ISV-Partner





# Komplexität



## ... und Vielfältigkeit

- **Kontraktlogistik – Unternehmen**
- **Zahlen für 2003**
  - Bedient ~250 Kunden
  - Beauftragt ~8500 Transportunternehmen
  - Beauftragt durchschnittlich 40,000 Lieferungen täglich
  - Ca. 6 Mrd. \$ Frachtaufkommen
- **ILOG Optimierung**
  - konsolidiert die Lieferungen
  - routet die Transportwege
  - wählt die Transportart aus
  - reduziert die insgesamt gefahrenen Kilometer
- **Schneider Logistic berichtet von 5%-25% Reduzierung der Transportkosten**

# Komplexität



## ... und Vielfältigkeit

- **“One of the things that challenges us most is that different businesses have widely different sized problems. Using ILOG [Optimization] our solution method is robust enough to handle problems varying greatly in scale”**

**Ted Gifford, Director of Research  
Schneider Logistics**

# Komplexe Modellbildung



## ILOG Transport PowerOps

- Belade-Planung (Kapazitäten)
- Design-Entscheidungen
  - Pooling, Cross-Docking, Hub-Spoke
- Auswahl der Transportart
- Reale und Qualitäts-Kosten
- Reihenfolge-Planung der Belieferung
- Zeitliche Feinplanung (Scheduling, Zeitfenster)
- Alles in EINEM Optimierungsmodell

# Komplexe Modellbildung



## ILOG Transport PowerOps

- Insgesamt 114 Tabellen in einem relationalen Datenmodell
- Kategorien:
  - Dimensionen, Distanz-Matrix, Lokationen, Besuche, Fahrzeuge, Ruhepausen, Ressourcen, Stops, Kostenstrukturen, Kompatibilitäten, Hubs, Ergebnisdarstellung
- Und immer noch bleiben Transport-Aspekte offen!

# Die Komplexität ist immer noch da!



## Nicht von Transport PowerOps abgedeckt



Nachtflugnetz - Hauptlauf

Flottenreduktion um 10 Flugzeuge



Flüssig-Gas Transport

VMI (Vendor Managed Inventory)



Beladungsplanung

JIT-Beladung der Bier-Transporter



Frequenzplanung

Periodic Vehicle Routing

## Agenda



- **Komplexität in der Transport-Planung für reale Probleme**
- **Projekt-Beispiel: Frequenzplanung**

# Frequenzplanung



- **Die Planungsaufgabe:**

- Ein Geldtransportunternehmen holt in festgelegten Intervallen (1x, 2x, ... in der Woche) von seinen Kunden Bargeld ab.
- Es gibt weitere Kunden die zu festgelegten Tagen in der Planungsperiode beliefert werden.
- Es existieren Randbedingungen für Kapazitäten, Lenkzeiten, Zeitfenster, Besuchsmuster
- Entscheidung: An welchem Tag soll ein Kunde besucht werden; Tourenplanung für die einzelnen Tage
- Ziel: Fahrkilometer und Fahrzeugflotte senken.

# Frequenzplanung



- **CORBITCONNECT AG:**

- Ist Software-Anbieter für Transportplanung (PLANTOUR™), Fuhrparkmanagement, Flottensteuerung und Mobile Navigation.
- Stellt in seiner Praxis fest, dass individuelle Bedarfe der Planer erhöhte Anforderungen an die Optimierung stellen.
- Ist langjähriger ILOG Partner bei der Transport-Optimierung.

# Frequenzplanung



- **Haupt-Beitrag von:**

- Dr. Wolfgang Renz, CorbitConnect AG
- Dr. Stephane Michel, ILOG AG
- Dr. Norbert Ascheuer, atesio GmbH/ILOG Partner

- **Begleitung des Projekts:**

- Dr. Frederik Stork, ILOG AG
- Dr. Hermann Stolle, ILOG AG

# Frequenzplanung



- **Dekomposition des Problems:**

- Clusterbildung (Abholung bei Kunden einer Ortschaft möglichst am gleichen Tag)
- Festlegen der Besuchsmuster
- Routenplanung bei festgehaltenen Wochentags-Mustern
- Routenplanung mit gleitenden Planungs-Zeitfenstern.

# Frequenzplanung



- **Größenordnungen:**

- Plan-Regionen mit bis zu 1000 Kunden
- Typisches Beispiel mit 560 Kunden
- Planungszeitraum bis zu zwei Wochen
- Flotte mit ca. 15 Fahrzeugen

# Frequenzplanung



- **Optimierungsansatz für Cluster-Bildung und Zuweisung der Wochentage:**
- **Spaltengenerierung:**
  - Besuchsmuster für die Kunden, Vollständige Generierung aller zulässigen Muster.
  - Kunden-Cluster für die Wochentage, Generierung einer Auswahl mit Nächste-Nachbarn-Ansätzen
- **Formulierung als Gemischt-Ganzzahliges Lineares Programm**

# Frequenzplanung



- **Vorteil der Spaltengenerierung**

- Komplexe Regeln sind in den Spalten enthalten
- Bessere Erweiterbarkeit durch Hinzufügen von weiteren Nebenbedingungen (z. B. Kapazitäten) zum Master-Problem bzw. für die Generierung der Spalten.
- Exaktere Modellierung

- **Größenordnungen:**

- Ca. 1500 Besuchsmuster generiert
- Ca. 20000 Kundencluster generiert

# Frequenzplanung



## Formulierung des Mathematischen Programms

- **Variablen**

- Auswahlvariablen für die Cluster jeweils pro Tag
- Auswahlvariablen für die Besuchsmuster für jeden Kunden
- Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge pro Tag und insgesamt

- **Zielfunktion**

- Clusterkosten und #Fahrzeugflotte minimieren

- **Nebenbedingungen**

- Auswahl der Cluster pro Tag
- Auswahl eines Besuchsmuster für jeden Kunden
- Wenn Kunde an Tag  $d$  beliefert wird, muss ein entsprechendes Cluster ausgewählt worden sein.
- Die Anzahl der ausgewählten Cluster definiert die Anzahl der Fahrzeuge
- Die Größe der Fahrzeugflotte ist das Maximum über den Tagesbedarf



# Frequenzplanung



- **Projektaufwand bislang 25 Tage für die Optimierungs-Aufgabe**
- **Laufzeitverhalten für mittlere Beispiele:**
  - 30-120 Minuten für das GGLP
  - 10 Minuten: Schnelle Einstellung der Tourenplanung
  - 30-60 Minuten: Ausführliche Tourenplanung
  - Verbesserung der Performance des GGLP erscheint möglich und ist im Fokus der weiteren Arbeit.

## Frequenzplanung - Zusammenfassung



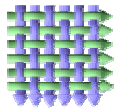
- **Komplexe Aufgabenstellung und realistische Größenordnung**
- **Integrierte prototypische Lösung mit 25 Tagen Optimierungs-Consulting**
- **Akzeptable Lösungen für die Praxis**
- **Performance-Verbesserungen weiter im Fokus der Arbeit**



# **Herausforderungen bei der Optimierung großer Netze der Logistik: Beispiel Tourenplanung**

**Andreas Reinholz**

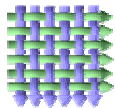
**Universität Dortmund**



# ***Herausforderungen bei der Optimierung großer Netze der Logistik: Beispiel Tourenplanung***

**GOR AG Logistik und Verkehr  
10.03.2006  
Bonn**

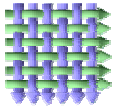
**Andreas Reinholz**



## **Gliederung**

- Eigenschaften logistischer Optimierungsaufgaben
- Kriterien zur Auswahl geeigneter Optimierungsverfahren
- Evolutionäre Algorithmen
- Aufgabenbeschreibung und Zielsetzung des Projektes
- Bearbeitete Vehicle Routing Problems
- Leistungsbewertung anhand von Benchmarks aus der Literatur
- Weiteres Vorgehen und Visionen

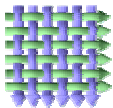




## Eigenschaften logistischer Optimierungsaufgaben

### Gemischt-ganzzahlige Optimierungsaufgaben mit Restriktionen

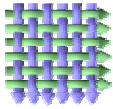
- Viele verschiedenartige Restriktionen
- Mehrere konkurrierende Zielsetzungen
- Einerseits Planungsaufgaben, andererseits „Online-Optimierung“
- Dynamische Optimierungsaufgaben mit wandernden Optima
- Offene bzw. gestörte Systeme, ungenaue bzw. unvollständige Daten
- Komplexe, hierarchisch geschachtelte Optimierungsaufgaben
- Interaktive Eingriffe sind notwendig



## Verschiedene Komplexitäten

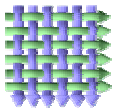
- Modellierung
  - viele heterogene Komponenten
  - hoher Vernetzungsgrad
  - viele Restriktionen
  - viele Bewertungskriterien (Kennzahlen)
- Berechnungskomplexität der Bewertungskriterien
  - Funktionsauswertung
  - Simulation
  - Auswertung verschiedener Szenarien, statistische Untersuchungen
- Schwierigkeitsgrad des Optimierungsproblems
  - Problemgröße, Anzahl und Definitionsbereich der Freiheitsgrade
  - Größe des Suchraumes
  - Komplexitätsklasse des Optimierungsproblems





## Umgang mit Komplexität

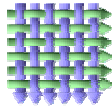
- Modellierung
  - Modularisierung
  - Zerlegung in Teilprobleme, funktionale Einheiten
  - Reduktion des Vernetzungsgrades, wohldefinierte Schnittstellen
  - Hierarchische Dekomposition, geschachtelte Optimierungsaufgaben
- Berechnungskomplexität der Bewertungskriterien
  - Beschleunigte Funktionsauswertungen
  - Effiziente Datenstrukturen
  - Bewertung von Teilsystemen
- Schwierigkeitsgrad des Optimierungsproblems
  - Einsatz von Heuristiken
  - Reduktion des Suchraumes



## Kriterien zur Auswahl geeigneter Optimierungsverfahren

- Welche Lösungsgüte kann bei welchen Problemgrößen erreicht werden?
- Wie zuverlässig werden gute Lösungen gefunden?
- Welches Laufzeitverhalten zeigt das Optimierungsverfahren?
  - Welche Rechenzeit wird für eine festgelegte Lösungsgüte benötigt?
  - Wie skaliert diese Rechenzeit mit der Problemgröße?
- Wie hoch ist der Implementationsaufwand?
  - Insgesamt?
  - bei einem Re-Design (z.B. bei leicht veränderter Problemstellung)?
- Wie robust sind gefundenen Lösungen (z.B. bei gestörten Systemen)?
- Wird nur eine Lösung gefunden oder werden auch Alternativen berechnet?
- Können nicht lineare Modelle, stochastische Modelle oder Simulation als Zielfunktionen verwendet werden?





## Iterative Variations-/Selektionsverfahren

Initialisierung;

bewerte initialisierte Lösungen;

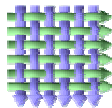
REPEAT

    modifiziere vorhandene Lösungen;

    bewerte modifizierte Lösungen;

    wähle aus den bisher erzeugten Lösungen die Kandidaten  
    für den nächsten Iterationsschritt aus;

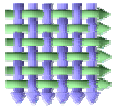
UNTIL Abbruchkriterium



## Beispiele Iterativer Variations-/Selektionsverfahren

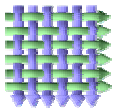
- Simulated Annealing
- Tabu Search
- Grand Deluge
- Threshold-Accepting
- **Neighborhood Search**
- **Variable Neighborhood Search**
- **Evolutionäre Algorithmen**
- Ant-Systems
- Scatter Search
- Adaptive Memory Programming





## Evolutionäre Algorithmen

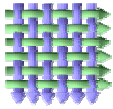
- universell anwendbar
  - ableitungsfrei
  - geeignet für gemischt-ganzzahlige, kombinatorische und restringierte Optimierungsaufgaben
- **einzigste Voraussetzung: bewertbare Systemzustände**
- erzeugen bei vielen Problemen mit hoher Zuverlässigkeit gute Lösungen
- leicht implementierbar
- leicht parallelisierbar
- geeignet für dynamische Optimierungsaufgaben mit wandernden Optima
- liefern relative stabile Ergebnisse, auch bei gestörten Zielfunktionen
- erweiterbar zur Lösung mehrkriterieller Optimierungsaufgaben



## Eigenschaften Hybrider Evolutionärer Algorithmen

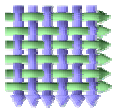
- Problemspezifische Repräsentation
- Problemspezifische Operatoren
- (Variable) Neighborhood Search
- Beschleunigte Funktionsauswertungen
- Effiziente Datenstrukturen
- Steuerbare Variationsmechanismen
- Selbstadaptation
- Dekompositionsstrategien





## Aufgabenstellung und Zielsetzung des Projektes M8

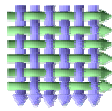
- Entwicklung einer standardisierten Vorgehenssystematik für den Entwurf leistungsfähiger "Hybrider Evolutionärer Algorithmen" anhand ausgesuchter Referenzproblemstellungen.
- Leistungsbewertung der entwickelten "Hybriden Evolutionären Algorithmen" im Vergleich zu anderen Heuristiken anhand von Benchmarks aus der einschlägigen Literatur.
- Verifizierung der Praxistauglichkeit der Vorgehenssystematik bei Problemstellungen der Anwendungsprojekte des SFB 559



## Aufgaben für den Designer der Optimierungsaufgabe

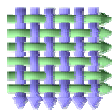
- Modellierung
  - Mathematische oder algorithmische Beschreibung des Suchraumes
  - Definition aussagekräftiger Bewertungsfunktionen
  - Beschreibung der Restriktionen
  - Definition von Bewertungskriterien für Lösungen, die einzelne Restriktionen verletzen
- Bereitstellen der notwendigen Eingabegrößen für die Modellierung und Optimierung





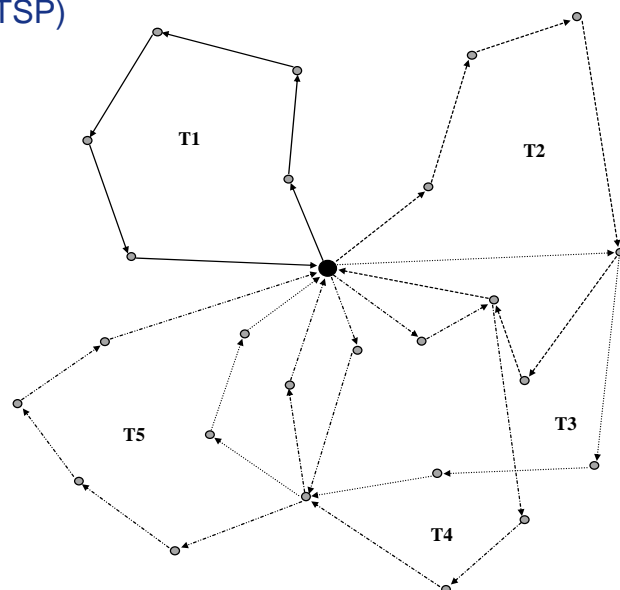
## Aufgaben für den Designer des Optimierungsverfahrens

- Codierung des Suchraumes
- Entwicklung von Variationsoperatoren, die aus bereits vorhandenen Lösungen neue Kandidaten generieren können
- Definition der Zielfunktionen aus
  - den Bewertungsfunktionen
  - den Straftermen für Verletzungen der Restriktionen
  - und zusätzlichen Steuerungstermen

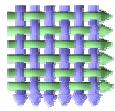


## Single Depot Vehicle Routing Problems

- "Traveling Salesman Problem" (TSP)
- "Capacitated VRP" (CVRP)
- "Period TSP" (PTSP)
- "Period VRP" (PVRP)

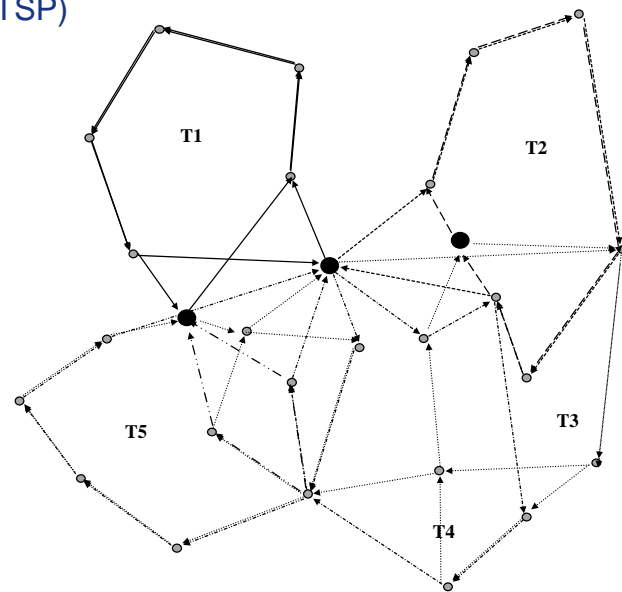




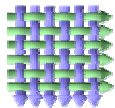


## Multiple Depot Vehicle Routing Problems

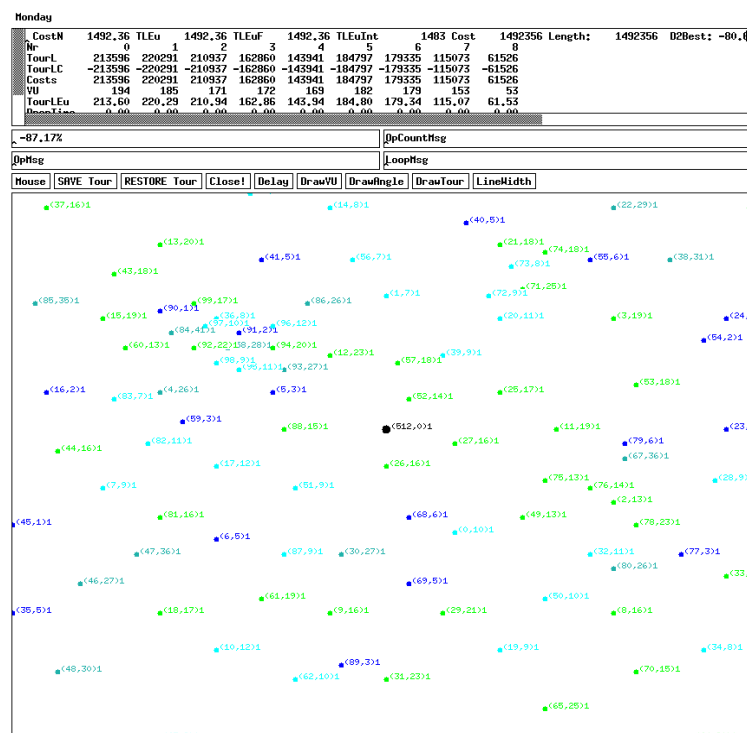
- "Traveling Salesman Problem" (TSP)
- "Capacitated VRP" (CVRP)
- "Period TSP" (PTSP)
- "Period VRP" (PVRP)
- "Multiple Depot VRP" (MDVRP)
- "Period MDVRP" (PMDVRP)



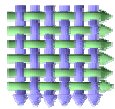
• 15 •



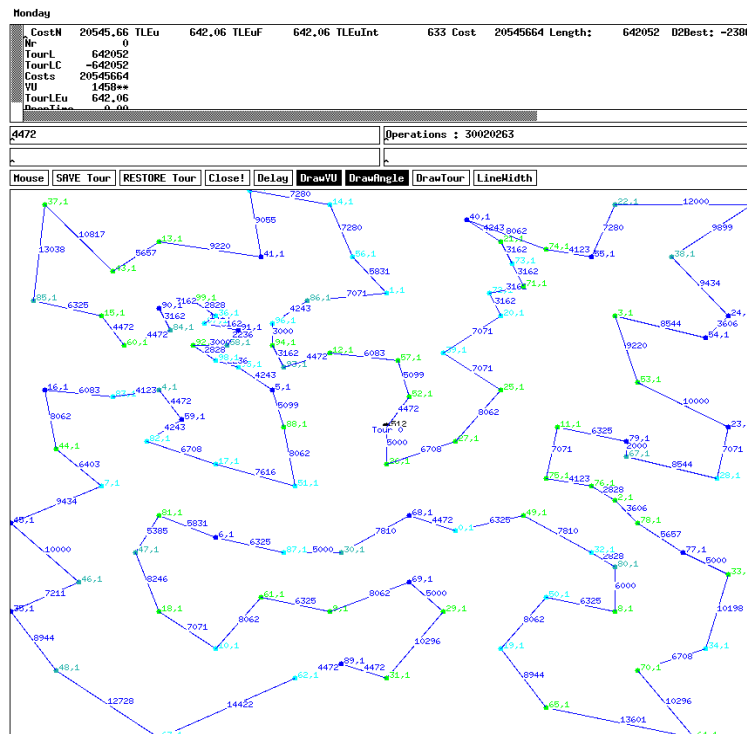
## Benchmarkinstanz C100 mit 100 Kunden



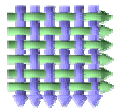
• 16 •



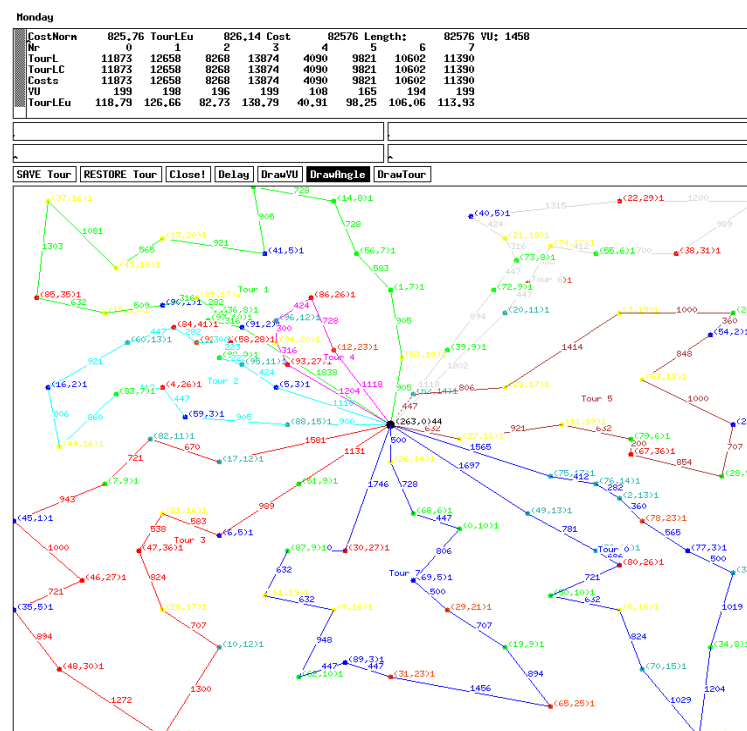
## Lösung von C100 als TSP



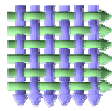
• 17 •



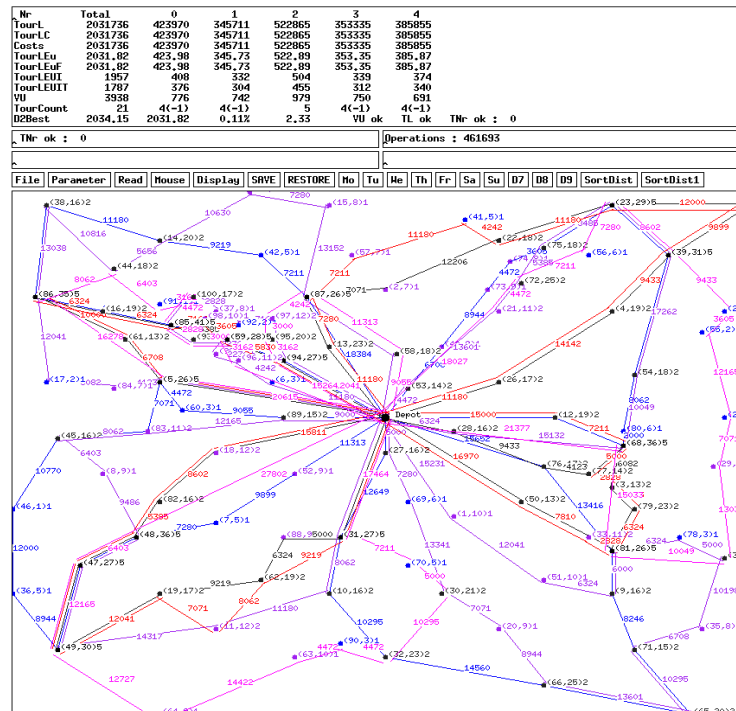
## Lösung von C100 als CVRP



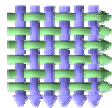
• 18 •



## Lösung von C100 als PVRP



• 19 •



## Hybride (1+1) – Evolutionsstrategie

G<sub>Nr</sub> := 0;

Initialization( Parent );

VariableNeighborhoodSearch ( Parent );

REPEAT

    G<sub>Nr</sub> := G<sub>Nr</sub>+1;

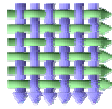
    Child := Mutation( Parent );

    VariableNeighborhoodSearch ( Child );

    if ( Fitness( Child ) => Fitness( Parent ) ) Parent := Child;

UNTIL Stoppingcriteria( G<sub>Nr</sub> ) OR Y3K;

• 20 •

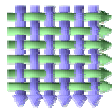


## Benchmarks: Lösungsqualität

**CVRP** bei allen 41 Benchmarkinstanzen wurden die besten bisher bekannten Lösungen berechnet, bei 12 Instanzen wurden neue beste Lösungen gefunden.

**PTSP** bei allen 33 Benchmarkinstanzen wurden die besten bisher bekannten Lösungen berechnet, bei 15 Instanzen wurden neue beste Lösungen gefunden.

**PVRP** bei allen 42 Benchmarkinstanzen wurden die besten bisher bekannten Lösungen berechnet, bei 31 Instanzen wurden neue beste Lösungen gefunden.



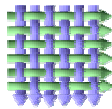
## Benchmarks: Lösungsqualität

**MDVRP** bei allen 33 Benchmarkinstanzen wurden die besten bisher bekannten Lösungen berechnet, bei 14 Instanzen wurden neue beste Lösungen gefunden.

**LSVRP** bei allen 30 Benchmarkinstanzen wurden die besten bisher bekannten Lösungen berechnet, bei 30 Instanzen wurden neue beste Lösungen gefunden.

**P-Hub** bei ca. 50 Benchmarkinstanzen wurden die besten bisher bekannten Lösungen berechnet, bei 0 Instanzen wurden neue beste Lösungen gefunden.





## Benchmarks: Qualität vs. Rechenzeit

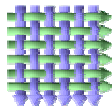
Welche Rechenzeit wird typischerweise benötigt, um Lösungsqualitäten im 5%- bzw. 1%- Bereich der besten bisher bekannten Lösungen zu berechnen?

ORLIB	n	Q	V	Xu und Kelly		Taillard		Reinholz			
				5%	1%	5%	1%	5%	3%	2%	1%
VRPNC1	50	160	5	39,0	46,2	2,8	11,0	0,3	0,8	1,2	1,4
VRPNC2	75	140	10	3,0	403,2	1,5	68,0	0,5	1,2	3,1	6,2
VRPNC3	100	200	8	9,0	142,8	15,0	900,0	1,4	1,6	3,0	3,9
VRPNC4	150	200	12	245,4	2304,6	25,0	1800,0	7,1	44,3	139,5	571,7
VRPNC11	100	200	10	31,2	70,8	51,0	350,0	1,8	2,3	2,7	2,8

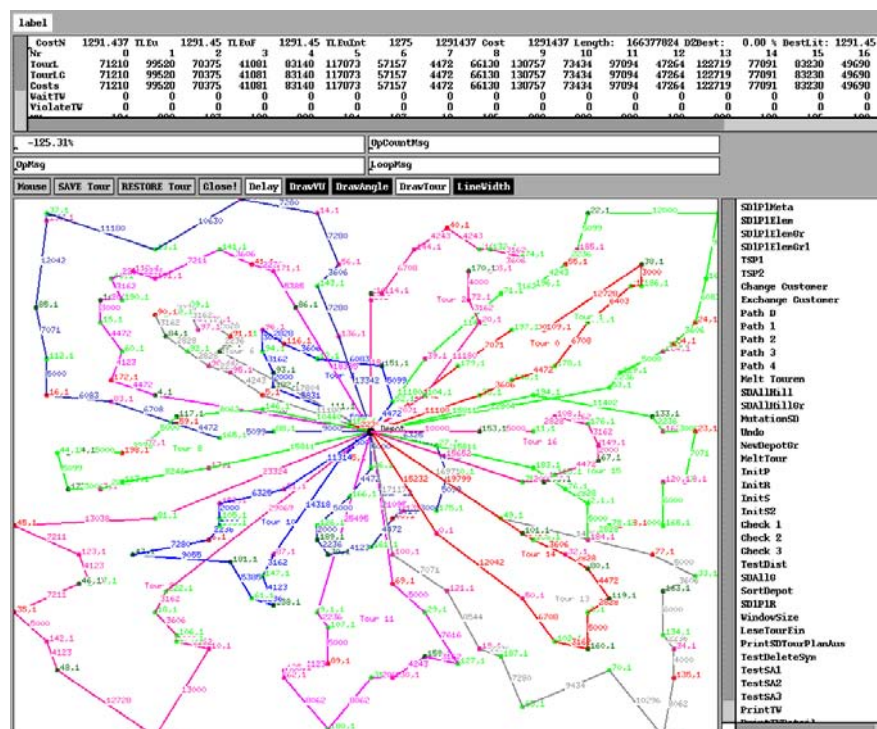
n = # Kunden, Q = Max. Fahrzeugkapazität, V = minimale # Fahrzeuge, Rechenzeit in Sekunden

### Verwendete Rechner

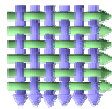
Xu und Kelly      DEC ALPHA, DEC OSF/1 v.30  
Taillard          Silicon Graphics Indigo  
Reinholz         INTEL PENTIUM II 300



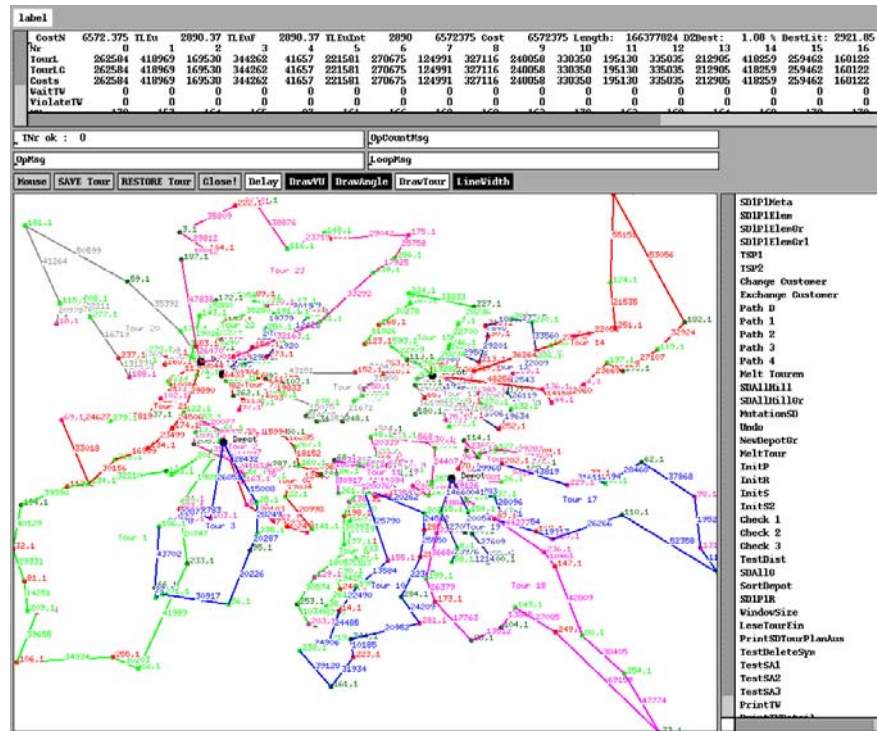
## CVRP: Beste bekannte Lösung für 199 Kunden



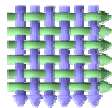




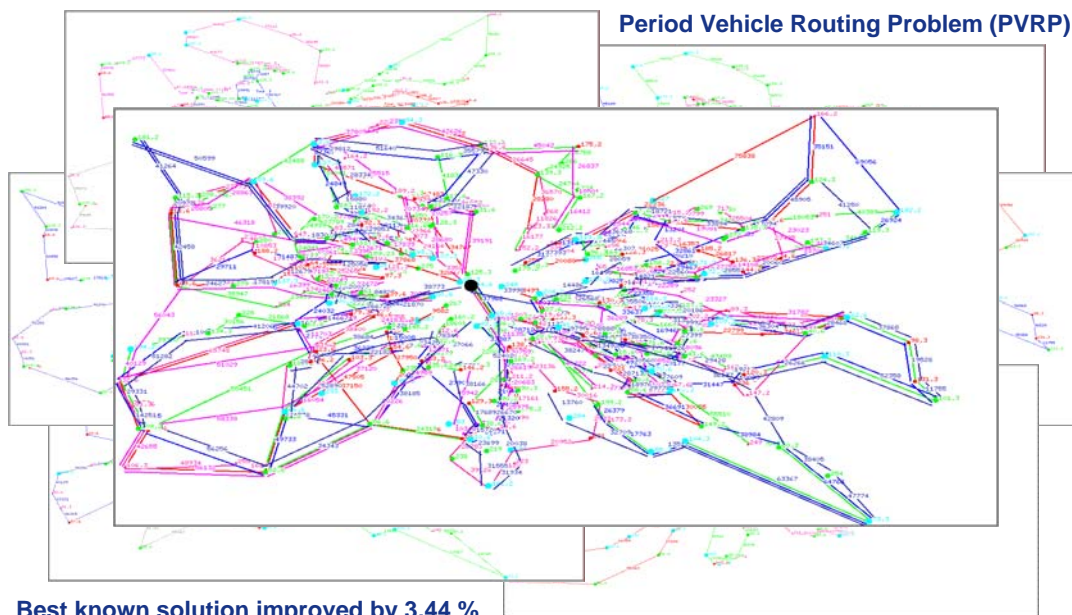
## MDVRP: Beste bekannte Lösung für 288 Kunden, 4 Depots



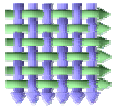
• 25 •



## PVRP: Beste bekannte Lösung für 288 Kunden, 6 Tage



• 26 •

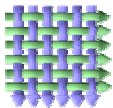


## Real World VRP

- Split Demand or Single Unit VRPTW with Backhauls and Pickup and Delivery
- Heterogeneous fleet
- Capacity limit, different and flexible compartments, load restrictions
- Fixed costs and customer and order dependent costs
- Asymmetric distance and driving costs
- Tour length limit, customer specific service times, back on route times
- Traffic flow factor
- Flexible starting times
- Up to 100.000 Units per day
- Multiple depots and cross docking



• 27 •



## Weiteres Vorgehen und Visionen

- Bearbeitung komplexerer hierarchisch gekoppelter Optimierungsaufgaben
- Behandlung weiterer Restriktionen
- Kopplung verschiedenartiger Variationsmechanismen
- Adaptive Strategieberücksichtigung
- Dynamische Optimierungsprobleme
- Multikriterielle Optimierungsprobleme
- Berücksichtigung gestörter Zielfunktionen



• 28 •

# **Leistungsbewertung verschiedener Optimierungsverfahren für das p-Hub-Problem**

**Hilmar Heinrichmeyer**

**IML Fraunhofer Dortmund**





# Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem

Vortrag bei der 37. Sitzung der Arbeitsgruppe „Logistik und Verkehr“  
der Gesellschaft für Operations Research (GOR)

Dipl.-Inform. Hilmar Heinrichmeyer  
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML)  
Abteilung Verkehrslogistik

Bonn, 10.03.2006



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 1

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## Gliederung

- Service-Netze und das p-hub-Problem
- Verwendete Optimierverfahren
- Untersuchungsumfang
- Leistungsbewertung
- Ausblick



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 2

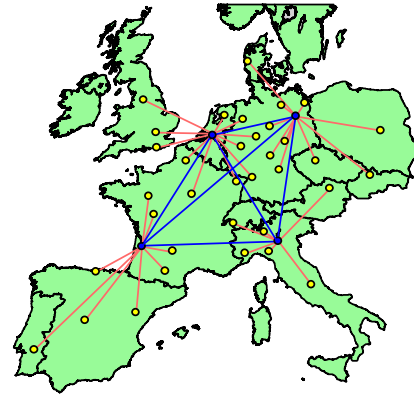
Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## Service-Netze – Aufgaben und Ziele

Optimierung von Depot- und Hubstandorten und des verknüpfenden Transportnetzes mit den Teilaufgaben

- Verbesserung des Servicegrades bzw. Erreichen eines vorgegebenen Servicegrades
- Untersuchung der Einsparpotentiale bei den Netzkosten
- Berechnung von Hauptlauf-Fahrplänen



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 3

Fraunhofer  
 Institut  
 Materialfluss  
 und Logistik



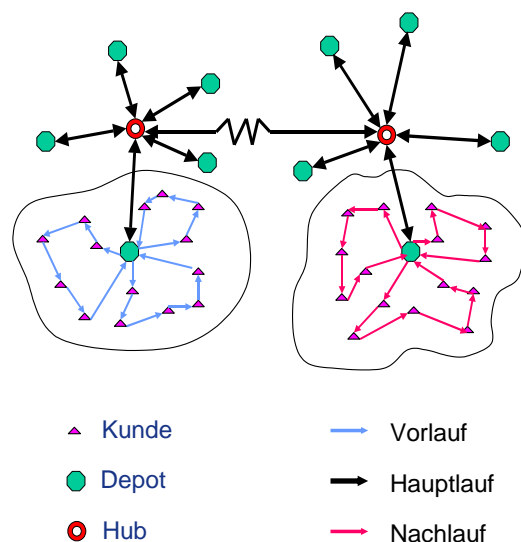
## Aufbau eines Service-Netzes

Elementare Bestandteile von Service-Netzen sind **Kunden** (Sendungsversand und -empfang), **Depots** (Sammel- und Verteilfunktion in der Fläche) und **Hubs** (Konsolidierungsfunktion im Transport).

Aufgabe von Service-Netzen ist der **Sendungsaustausch** zwischen den Kunden.

Die **Transportkette** für jede Sendung ist Kunde => **Abholung/Vorlauf** => Depot [=> **Hauptlauf** => Hub (=> **Hauptlauf** => Hub) => **Hauptlauf** => Depot] => **Nachlauf/Zustellung** => Kunde.

Im Hauptlauf muss jedes Depot mit jedem anderen Depot verbunden sein.



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 4

Fraunhofer  
 Institut  
 Materialfluss  
 und Logistik

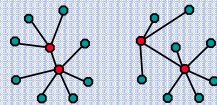


## Optimierungsaufgabe: p-hub-Problem

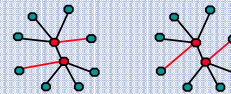
Für eine gegebene Anzahl und Lage von Depotstandorten und eine gegebene Transportmenge zwischen je zwei Depots soll

- die optimale **Anzahl und Lage von Hubstandorten** und
  - die optimale **Zuordnung der Depots zu den Hubs**
- ermittelt werden, wobei als Hubstandorte nur Depots in Frage kommen.

a) = Auswahlproblem



b) = Zuordnungsproblem



(a+b) => p-hub-Problem



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



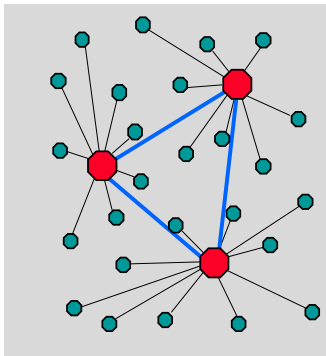
Seite 5

Fraunhofer  
 Institut  
 Materialfluss  
 und Logistik

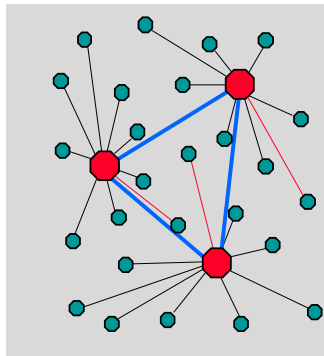


## Varianten des p-hub-Problems

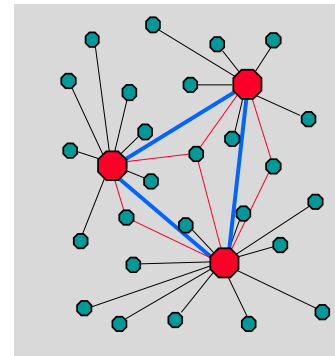
Jedes Depot wird dem  
**nächsten** Hub zugeordnet:



Jedes Depot wird **einem**  
 der Hubs zugeordnet:



Jedes Depot kann **mehreren**  
 Hubs zugeordnet werden:



Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass jedes Depot dem nächsten Hub zugeordnet wird.



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 6

Fraunhofer  
 Institut  
 Materialfluss  
 und Logistik



## Kennzahlen für die Netzbewertung

Das Planen von Service-Netzen erfordert die gleichzeitige Verfolgung der konkurrierenden Ziele **Kostenminimierung** und **Servicemaximierung**.

Für die Bewertung verschiedener Strukturvarianten von Service-Netzen werden die beiden Kennzahlen **Hauptlauf-Transportkosten** und **Hauptlauf-Servicequalität** genutzt und zur Kennzahl **Netzqualität** zusammengeführt.

$$\text{Netzqualität} = \frac{\text{Skalierungsfaktor}}{(\text{Hauptlauf-Transportkosten} * \text{HTK-Gewichtungsfaktor} + \text{Hauptlauf-Servicequalität} * \text{HSQ-Gewichtungsfaktor})}$$



## Komplexität der Optimierungsaufgabe

Das Service-Netz mit der optimalen Netzqualität kann nur mit einer vollständigen Enumeration aller möglichen Hub-Auswahlen ermittelt werden.

Bei  $n$  Depots und  $p$  Hubs müssen  $\binom{n}{p}$  Netze berechnet werden.

Aus Laufzeitgründen ist dies nur für kleine  $n$  und  $p$  praktikabel.

Für große  $n$  und  $p$  werden Heuristiken benötigt.





## Verwendete Optimierungsverfahren für das p-hub-Problem

4 verschiedene Optimierungsverfahren sind untersucht worden:

Vollständige Enumeration

Neighborhood Search Heuristik (nach John G. Klincewicz)

(1+1)-Evolutionsstrategie (ES)

Evolutionäre Algorithmen mit Rekombination (EA)



Leistungsbewertung verschiedener Optimierungsverfahren für das p-hub-Problem



Seite 9

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## Neighborhood Search Heuristik (nach Klincewicz)

- (a) **initialisiere** alle  $p$  Hubs mit einem Depot per Zufall;  
**berechne die Netzqualität;**
- (b) **für jedes  $p$** 
  - setze **jedes Depot** einmal als Hub  $p$ ;
  - berechne die Netzqualität;**
  - wähle das Depot mit der besten Netzqualität als Hub  $p$ ;**
- (c) **wiederhole** Schritt (b) **bis** keine Verbesserung gefunden wird.

**Nachteil:** Es kann immer nur ein einziger Hub ausgetauscht werden.



Leistungsbewertung verschiedener Optimierungsverfahren für das p-hub-Problem



Seite 10

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## (1+1)-Evolutionsstrategie (ES)

Eltern-Netz in Generation  $t$



Netzqualität  
8,5314

Erzeugung des Kinder-Netzes  
durch **Mutation**



Netzqualität  
9,8832

Kinder-Netz in Generation  $t$

**Selektion** des besten Netzes  
als Eltern-Netz in Generation  $t+1$



Netzqualität  
9,8832



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



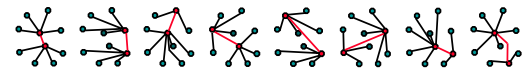
Seite 11

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

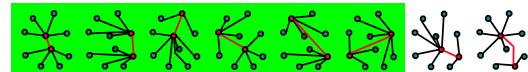


## Evolutionäre Algorithmen (EA) mit Rekombination

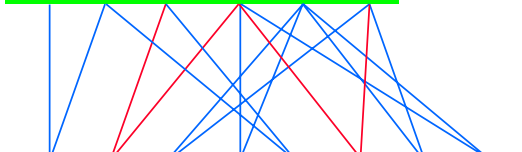
Eltern-Population in Generation  $t$



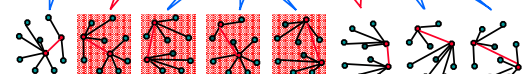
Durchführung der **Mating Selection**



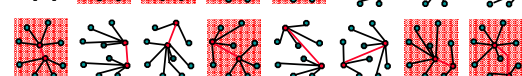
Durchführung der **Rekombination** und ggf.  
danach der **Mutation**



Kinder-Population in Generation  $t$



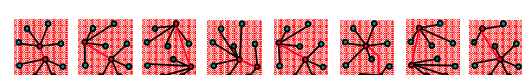
Eltern-Population in Generation  $t$



Durchführung der **Acceptance Selection**



Eltern-Population in Generation  $t+1$



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 12

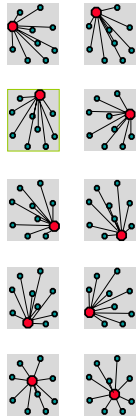
Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik





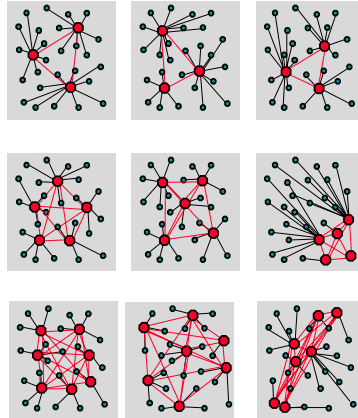
## Untersuchungsumfang: 30 Probleminstanzen = 3 Service-Netze mit jeweils 10 Hub-Anzahlen (1 bis 10)

10 Depots



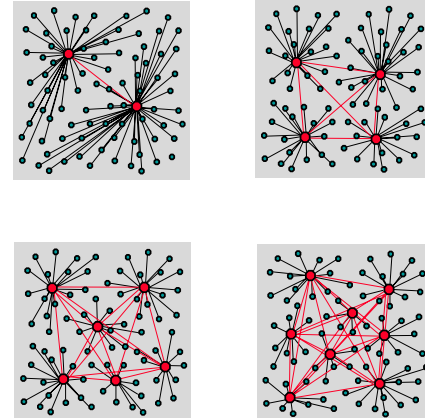
1 Hub

29 Depots



3 / 5 / 7 Hubs

84 Depots



2 / 4 / 6 / 8 Hubs



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 13

Fraunhofer  
 Institut  
 Materialfluss  
 und Logistik



## Untersuchungsumfang: Methoden und Parameter

Für jede der 30 Probleminstanzen 100 Optimierungsläufe mit

Neighborhood Search Heuristik (Klincewicz); keine Parameter

(1+1)-ES: 6 Mutationsraten mit 16.384 Generationen

EA mit 8 Populationsgrößen (zwischen 2 und 256 Individuen)  
 mit bis zu 512 Generationen  
 mit 6 Mutationsraten ( $1/10n$ ,  $1/3n$ ,  $1/2n$ ,  $1/n$ ,  $2/n$ ,  $3/n$ )  
 mit 4 Selektionsdrücken (2, 4, 8, 16).



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 14

Fraunhofer  
 Institut  
 Materialfluss  
 und Logistik



## Untersuchungsziel: Leistungsbewertung

**Welches sind die effizientesten Optimiervverfahren und Parameterkombinationen für die einzelnen Probleminstanzen?**

Berechnung der Effizienz aus den Ergebnissen der Optimierungsläufe:

- Nur Verfahren und Parameterkombinationen, die die beste Netzqualität für die Instanz gefunden haben, wurden weiter untersucht (Zuverlässigkeit).
- Die durchschnittliche Anzahl erzeugter Netze in jedem der 100 Läufe,
- die Anzahl der Läufe ( $\leq 100$ ) mit gefundener bester Netzqualität, und
- die nötige Anzahl Läufe, um mit 90 %-iger Wahrscheinlichkeit mindestens einen Lauf mit der besten Netzqualität zu haben (Multi-Start-Faktor) wurden verwendet, um die Effizienz der Verfahren zu berechnen.



Leistungsbewertung verschiedener Optimiervverfahren für das p-hub-Problem



Seite 15

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## Leistungsbewertung

84 Depots 3 Hubs		beste Parameterkombination durch Experiment ermittelt			beste erreichte Netzqualität (NQ) aus 100 Läufen	durchschnittliche Anzahl Netzbe-rechnungen für 1 Lauf (von 100)	Anzahl Läufe mit bester ei-ge-ner NQ	Anzahl Läufe mit bester be-kann-ter NQ	Multi-start-faktor für 90%-ige WSLK für beste bekannte Lösung	Anzahl Netzbe-rechnungen für beste bekannte Lösung mit 90%-iger WSLK	Effizienz-kennzahl für das Finden der besten bekannten Lösung mit 90%-iger WSLK
		Anzahl Indi-vi-duen	Muta-tions-rate	Selek-tions-druck							
Optimiervverfahren											
vollständige Enumeration		1	-	-	-	8,999685	95.284	1	1	95.284	5,92
Heuristik nach Klincewicz I		1	-	-	-	8,999685	665	3	3	50.540	11,17
(1+1)-Evolutionsstrategie		1	1/10n	-	512	8,999685	513	20	20	5.643	100,00
(1+1)-Evolutionsstrategie		1	1/3n	-	2048	8,999685	2.049	32	32	12.294	45,90
(1+1)-Evolutionsstrategie		1	1/2n	-	256	8,999685	257	6	6	9.766	57,78
(1+1)-Evolutionsstrategie		1	1/n	-	512	8,999685	513	15	15	7.695	73,33
(1+1)-Evolutionsstrategie		1	2/n	-	1024	8,999685	1.025	19	19	11.275	50,05
(1+1)-Evolutionsstrategie		1	3/n	-	2048	8,999685	2.049	26	26	16.392	34,43
genetischer Algorithmus		2	1/10n	2	512	8,999685	1.029	26	26	8.232	68,55
genetischer Algorithmus		4	1/10n	2	256	8,999685	1.033	25	25	9.297	60,70
genetischer Algorithmus		8	1/10n	2	1	8,999685	25	1	1	5.750	98,14
genetischer Algorithmus		16	1/10n	8	64	8,999685	1.057	32	32	6.342	88,98
genetischer Algorithmus		32	1/3n	16	32	8,999685	1.089	29	29	7.623	74,03
genetischer Algorithmus		64	1/10n	16	32	8,999685	2.177	45	45	8.708	64,80
genetischer Algorithmus		128	1/2n	8	16	8,999685	2.305	52	52	9.220	61,20
genetischer Algorithmus		256	1/2n	16	32	8,999685	8.705	100	100	8.705	64,82



Leistungsbewertung verschiedener Optimiervverfahren für das p-hub-Problem



Seite 16

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik





## Beispielnetz für 3 Hubs bei 84 Depots

### Beste Netzqualität:

8,999685

### Effizientestes Verfahren:

(1+1)-Evolutionstrategie  
mit 5.643 Netzberechnungen

### Parameterkombination:

Mutationsrate: 1/10n

Generationsanzahl: 512

Multistartfaktor: 11



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem

Seite 17

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## Ergebnis: Die effizientesten Verfahren der 30 Instanzen

Hubs	Optimierverfahren für Hub-Auswahl	10 Depots					29 Depots					84 Depots				
		beste erreichte Netz- qualität (NQ) aus 100 Läufen	Anz. Netz- be- rech- nungen pro Lauf	Anzahl Multi- start- fak- tor für 90% WSLK	Anz. Netz- be- rech- nungen pro Lauf	beste erreichte Netz- qualität (NQ) aus 100 Läufen	Anz. Netz- be- rech- nungen pro Lauf	Anzahl Multi- start- fak- tor für 90% WSLK	Anz. Netz- be- rech- nungen pro Lauf	beste erreichte Netz- qualität (NQ) aus 100 Läufen	Anz. Netz- be- rech- nungen pro Lauf	Anzahl Multi- start- fak- tor für 90% WSLK	Anz. Netz- be- rech- nungen pro Lauf	beste erreichte Netz- qualität (NQ) aus 100 Läufen	Anz. Netz- be- rech- nungen pro Lauf	Anzahl Multi- start- fak- tor für 90% WSLK
1	vollständige Enumeration	29,291154	10	1	10	26,458526	29	1	1	29	7,456899	84	1	1	84	84
	Heuristik nach Klinowicz I	29,291154	19	100	1	19	26,458526	59	100	1	59	7,456899	166	100	1	166
	(1+1)-Evolutionstrategie	29,291154	9	61	3	27	26,458526	9	23	9	81	7,456899	9	14	16	144
2	genetischer Algorithmus	29,291154	37	96	1	37	26,458526	9	40	5	45	7,456899	69	56	3	207
	vollständige Enumeration	29,291154	45	1	1	45	406	1	1	406	3,486	1	1	3,486	1	3,486
	Heuristik nach Klinowicz I	29,291154	34	100	1	34	26,160205	119	100	1	119	8,037035	334	90	1	334
3	genetischer Algorithmus	29,291154	17	64	3	52	26,160205	65	59	3	196	8,037035	9	2	114	1,026
	(1+1)-Evolutionstrategie	29,291154	21	38	5	105	26,160205	321	92	1	321	8,037035	273	56	3	819
	vollständige Enumeration	29,291154	120	1	1	120	3,654	1	1	3,654	95	284	1	1	95	284
4	Heuristik nach Klinowicz I	29,797378	50	44	4	199	27,514101	196	79	2	390	8,999685	665	3	76	50,570
	(1+1)-Evolutionstrategie	29,797378	9	11	20	182	27,514101	257	70	2	514	8,999685	513	20	11	5,643
	genetischer Algorithmus	29,797378	81	44	4	154	27,514101	13	4	57	741	8,999685	25	1	230	5,750
5	vollständige Enumeration	30,873726	210	1	1	210	28,885038	23	751	1	1	23,751	1,929	501	1	1,929
	Heuristik nach Klinowicz I	30,873726	56	76	2	113	28,885038	311	57	3	932	8,908527	978	15	15	14,672
	(1+1)-Evolutionstrategie	30,873726	33	42	5	167	28,885038	9	3	76	684	8,908527	65	1	230	14,950
6	genetischer Algorithmus	30,873726	285	96	1	285	28,885038	2,081	96	1	2,081	8,908527	41	4	4	4,619
	vollständige Enumeration	31,052043	252	1	1	252	118,755	1	1	118,755	30,872	016	1	1	30,872	016
	Heuristik nach Klinowicz I	31,052043	82	82	2	124	28,430090	377	11	20	7,535	8,883835	1,247	13	17	21,192
7	(1+1)-Evolutionstrategie	31,052043	19	11	28	189	28,430090	257	6	38	9,768	8,883835	2,049	5	45	82,209
	genetischer Algorithmus	31,052043	265	92	1	265	28,430090	4,128	92	1	4,128	8,883835	299	2	114	32,546
8	vollständige Enumeration	30,641010	210	1	1	210	475,020	1	1	475,020	406,481	544	1	1	406,481	544
	Heuristik nach Klinowicz I	30,641010	55	33	6	331	28,079634	442	24	9	3,989	8,780171	1,561	3	76	118,645
	(1+1)-Evolutionstrategie	30,641010	5	5	45	227	28,079634	257	4	57	14,645	8,780171	513	1	230	117,999
9	genetischer Algorithmus	30,641010	9	8	28	252	28,079634	273	8	28	7,644	8,780171	2,177	3	25	62,958
	vollständige Enumeration	30,360992	120	1	1	120	1,560	780	1	1	1,560	780	4,529E+09	1	1	4,529E+09
	Heuristik nach Klinowicz I	30,360992	49	14	16	773	27,713882	578	45	4	2,314	8,561644	1,944	12	19	36,938
10	(1+1)-Evolutionstrategie	30,360992	9	11	20	182	27,713882	129	3	76	8,808	8,561644	1,025	2	114	116,850
	genetischer Algorithmus	30,360992	37	40	5	185	27,713882	81	4	57	4,617	8,561644	2,081	10	22	45,782
11	vollständige Enumeration	28,313433	45	1	1	45	4,292	145	1	1	4,292	145	4,366E+10	1	1	4,366E+10
	Heuristik nach Klinowicz I	28,313433	37	100	1	37	26,797436	561	23	9	8,052	8,431845	2,332	2	114	255,270
	(1+1)-Evolutionstrategie	28,313433	17	49	4	69	26,797436	257	5	45	11,565	8,402302	16,385	0	0	0
12	genetischer Algorithmus	28,313433	41	58	3	123	26,797436	295	8	28	7,420	8,431845	2,085	8	28	45,782
	vollständige Enumeration	26,871607	19	100	1	19	25,119948	586	20	11	6,443	8,249328	2,616	7	32	83,727
	Heuristik nach Klinowicz I	26,871607	19	100	1	19	25,119948	586	20	11	6,443	8,249328	2,616	7	32	83,727
13	(1+1)-Evolutionstrategie	26,871607	25	94	1	25	25,119948	251	8	28	2,300	8,249328	2,616	7	32	83,727
	genetischer Algorithmus	26,871607	25	94	1	25	25,119948	251	8	28	2,300	8,249328	2,616	7	32	83,727
	vollständige Enumeration	22,734506	1	100	1	1	22,257339	708	9	25	17,708	8,064451	3,039	7	32	97,239
14	Heuristik nach Klinowicz I	22,734506	5	100	1	5	22,257339	129	1	230	29,670	7,889484	16,385	0	0	0
	(1+1)-Evolutionstrategie	22,734506	7	100	1	7	22,257339	2,113	24	9	19,017	8,064451	1,281	4	57	73,017
	genetischer Algorithmus	22,734506	7	100	1	7	22,257339	2,113	24	9	19,017	8,064451	1,281	4	57	73,017

Vollständige Enumeration
Neighborhood Search
(1+1)-Evolution- strategie
Evolutionäre Algorithmen



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem

Seite 18

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## Generalisierung: Bildung von Komplexitätsklassen

	$\binom{n}{p}$	n	p
1	$\binom{n}{p} < 10^2$	10	1
2	$\binom{n}{p} < 10^4$	45	2
3	$\binom{n}{p} < 10^6$	120	3
4	$\binom{n}{p} < 10^8$	210	4
5	$\binom{n}{p} < 10^{10}$	252	5
6	$\binom{n}{p} \geq 10^{10}$	210	6
7		120	7
8		45	8
9		10	9
10		1	10



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 19

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## Ergebnis: Die effizientesten Verfahren der Komplexitätsklassen und ihre Parameterkombinationen

Komplexitäts-klasse	effizientestes Verfahren	Populations-größe	Mutations-rate	Selektions-druck	Gene-rationen	Effizienz-bewertung
1	Vollständige Enumeration	1	-	-	-	94,29
	Neighborhood Search	1	-	-	-	72,10
	(1+1)-Evolutionstrategie	1	1/n	-	8	39,71
2	Neighborhood Search	1	-	-	-	75,07
	Vollständige Enumeration	1	-	-	-	56,97
	(1+1)-Evolutionstrategie	1	1/10n	-	32	47,61
3	Neighborhood Search	1	-	-	-	66,82
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/2n	16	64	58,82
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/3n	16	64	54,77
4	Neighborhood Search	1	-	-	-	92,79
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/10n	16	64	51,62
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/3n	16	256	50,13
5	Neighborhood Search	1	-	-	-	74,84
	Evolutionärer Algorithmus	64	1/3n	16	64	59,02
	Evolutionärer Algorithmus	4	1/10n	2	256	56,39
6	Evolutionärer Algorithmus	32	1/10n	16	128	86,15
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/10n	16	256	82,04
	Neighborhood Search	1	-	-	-	72,61



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 20

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



## Ausblick

- Veränderung von Anzahl und Grenzen der Komplexitätsklassen
- Ausweitung der empirischen Untersuchung auf komplexere Netze
- Entwicklung hybrider Verfahren mit Neighborhood Search und EA
- Anwendung der Ergebnisse der Leistungsbewertung auf Netze mit Zuordnung der Depots nicht nur zum nächsten Hub
- Einsatz der Leistungsbewertung für verschiedene Optimierungverfahren zur Standortoptimierung



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 21

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik



# Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!

Hilmar Heinrichmeyer  
Fraunhofer Institut Materialfluss und Logistik (IML)  
Abteilung Verkehrslogistik  
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4  
44227 Dortmund

[hilmar.heinrichmeyer@iml.fraunhofer.de](mailto:hilmar.heinrichmeyer@iml.fraunhofer.de)



Leistungsbewertung verschiedener Optimierverfahren für das p-hub-Problem



Seite 22

Fraunhofer  
Institut  
Materialfluss  
und Logistik

# **Planung von Transprotnetzen im öffentlichen Verkehr**

**Prof. Dr. Anita Schöbel**

**Universität Göttingen**

# Planung von Transportnetzen im öffentlichen Verkehr

Anita Schöbel

Institut für Numerische und Angewandte Mathematik  
Georg-August Universität Göttingen

10. März 2006

◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ ≡ ≡ ≡ ≡ ≡

Anita Schöbel (NAM)

10. März 2006

1 / 48

## Contents

- 1 öffentliche Verkehrsnetze
- 2 Linienplatzierung
- 3 Linienplanung im öffentlichen Verkehr
- 4 Kombination von Linienplanung und Linienplatzierung
  - ... in Sternen
  - ... in Bäumen
  - ... Ansätze aus der Theorie der Hub-Netzwerke
  - ... Ansätze für das allgemeine Problem
- 5 Ausblick

◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ ≡ ≡ ≡ ≡ ≡

Anita Schöbel (NAM)

10. März 2006

2 / 48

## Warum öffentlicher Verkehr?

- Weil es spannend ist!
- es geht um große Transportnetzwerke
- sehr verwandte Methoden

## Ablauf der Planung im öffentlichen Verkehr

### Betriebssicht

Umläufe Fahrzeuge  
|  
Umläufe Personal  
|  
Dienstplanung

Haltestellen

|  
Linien

|  
Fahrlagen

### Kundensicht

—  
Tarife

|  
Disposition

## Haltestellen

Wo sollte man Haltestellen bauen?



Standorttheorie ("Location Science")

## Linien

folgt gleich ...!

# Fahrpläne

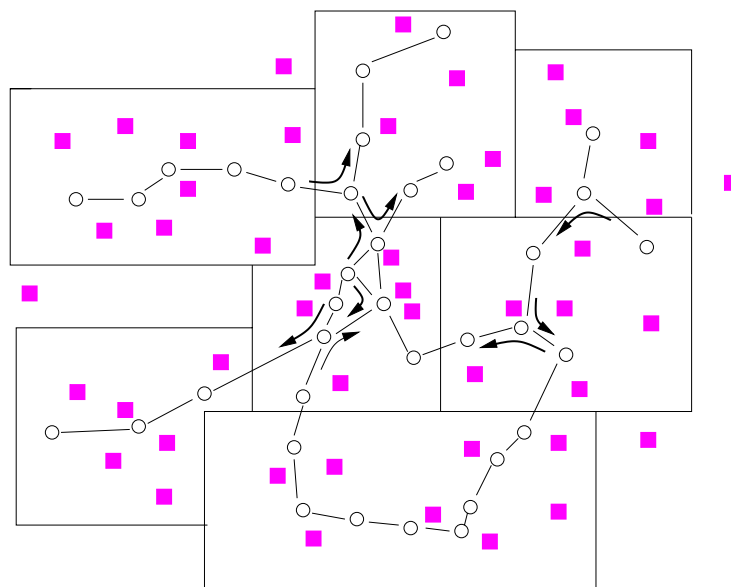
Wann soll welcher Zug fahren?



Ressourcen-beschränkte Pfade / Projektnetzwerke

# Tarife

Was soll eine Fahrkarte kosten?



Clustering



## Disposition

Warten oder nicht warten?

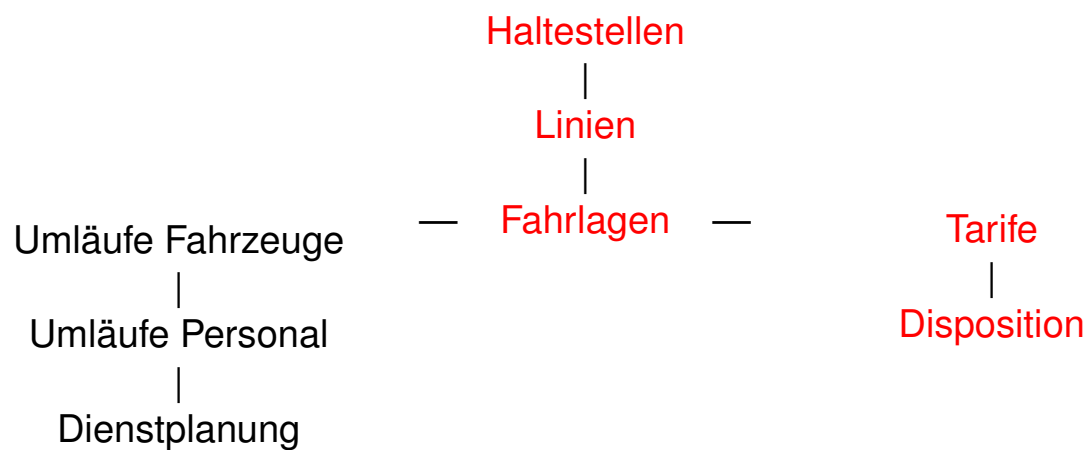


Unvorhersehbare Ereignisse in Projektnetzwerken

## Ablauf der Planung im öffentlichen Verkehr

### Betriebssicht

### Kundensicht





## Praktisches Problem

### Aufgabe:

Kann man im Rahmen eines gegebenen Budgets neue Linien finden, die den Bedarf besser bedienen?

(... und hoffentlich zu mehr Kunden führen.)

## Zwei verwandte Probleme

### Linienplatzierung ("path location")

### Linienplanung

Finde einen (oder mehrere) Wege  $l$   
in einem gegebenen Graph, so dass

$$\sum_{v \in V_{\text{Nachfrage}}} d(v, l)$$

$$\sum_{v, u \in V_{\text{Haltestellen}}} d(v, u)$$

minimiert wird.

## Linienplatzierung (“Path location”)

### Gegeben

- ein Graph
  - ▶ mit Knoten  $V$  (Kunden)
  - ▶ und Kanten  $E$  (mögliche Busstrecken)
- und eine Nachfrage  $w_v$  an jedem Knoten

### finde

- eine Menge von Pfaden
- im Rahmen eines gegebenen Budgets

die die Summe der Entfernungen von allen Kunden zu ihrem jeweils nächsten Knoten auf einem Pfad minimiert.

## Literatur

Über die Linienplatzierung gibt es innerhalb der Standortplanung viel Literatur!

## Literatur

### Übersichtsarbeiten:

- Labbé, Laporte, und Rodriguez-Martin: Path, tree, und cycle location
- Mesa und Boffey: Review of extensive facility location in networks

### Arbeiten innerhalb der letzten zwei Jahre:

- Ordered median objective: Puerto & Tamir
- Grid graphs: Hamacher & Schöbel
- Bi-objective: George & ReVelle
- Median Circles: Labbé, Laporte, Rodriguez-Martin & Gonzales
- Multi-source demands: Fernandez & Marin
- Equality measures: Lari, Puerto, Ricca & Scozzari
- ... und andere!

## Das Linienplanungsproblem

### Gegeben

- ein Verkehrsnetzwerk
  - ▶ mit Haltestellen  $V$
  - ▶ und direkten Verbindungen  $E$
- eine Menge an potentieller Linien  $\mathcal{L}^0$
- und Daten über Quelle-Ziel-Relationen der Kunden

### finde

- eine Menge an Linien
- (und Frequenzen)

so dass im Rahmen eines gegebenen Budgets der Komfort für die Kunden maximiert wird.

## Mögliche Zielfunktionen

- maximiere die Anzahl der Direktfahrer (=Kunden, die nicht umsteigen müssen)
- minimiere die Gesamtzahl der Umsteigevorgänge
- **minimiere die Gesamtreisezeit**

$$Reisezeit(x, y) = \alpha dist(x, y) + \beta |transfers|$$

Es gibt auch andere Modelle:

- kostenorientiert
- gewinnorientiert

## Literatur

Über das Linienplanungsproblem gibt es innerhalb des Gebietes “Verkehr und Logistik” viel Literatur!

## Literatur

### Kundenorientiert :

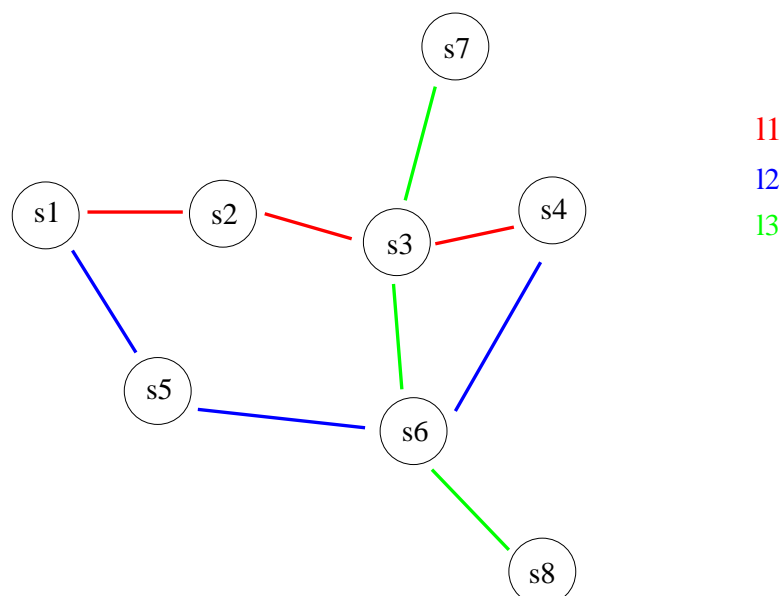
**Maximiere Direktfahrer:** Patz, Wegel, Dienst, Reinecke, Bussieck, Kreuzer, Zimmermann Krista, Wiegand, Simonis,

**Minimiere Reisezeit:** Laporte, Marin, Mesa, Ortega, Schöbel, Scholl, Borndörfer

**Kostenorientiert:** Claessens, Zwaneveld, van Dijk, Bussieck, Zimmermann, Lindner, Lübbecke Goessens, Hoesel, Kroon ...

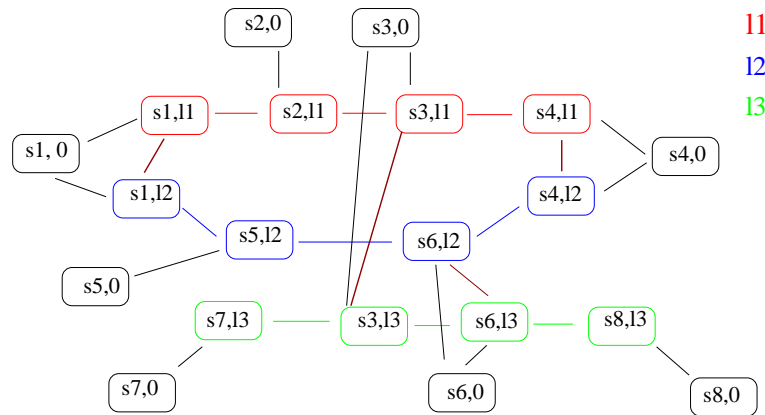
## Wie berechnet man die Reisezeit?

durch kürzeste Wege in einem erweiterten *change & go* Netzwerk (vgl. Schöbel & Scholl):



## Wie berechnet man die Reisezeit?

durch kürzeste Wege in einem erweiterten *change & go* Netzwerk (vgl. Schöbel & Scholl):



## Zwei verwandte Probleme: Unterschiede

### Linienplatzierung

### Linienplanung

Finde eine (oder mehrere) Pfade  $l$   
in einem gegebenen Graph, so dass

$$\sum_{v \in V_{\text{Nachfrage}}} \text{dist}(v, l)$$

minimiert wird.

- die Reisezeit innerhalb des Verkehrssystems wird nicht berücksichtigt
- normalerweise: Linien werden konstruiert

$$\sum_{v, u \in V_{\text{Haltestellen}}} \text{Reisezeit}(v, u)$$

minimiert wird.

- die Reisezeit zu der nächsten Haltestelle wird nicht berücksichtigt
- normalerweise: Potentielle Linien sind gegeben



## Kombination der beiden Probleme

### Hub-Linienplatzierung

Finde einen (oder mehrere) Wege  $\mathcal{L}$  in einem gegebenen Graph, so dass

$$\sum_{u,v \in V_{\text{Nachfrage}}} D(u, v)$$

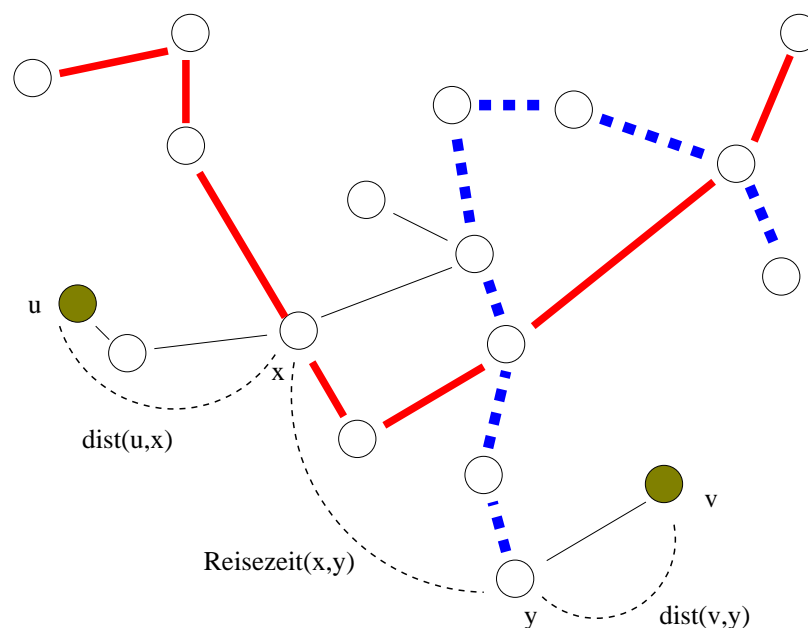
minimiert wird.

$$D(u, v) = \min_{x,y \in \mathcal{L}} \{ \gamma \text{dist}(u, x) + \text{Reisezeit}(x, y) + \gamma \text{dist}(y, v) \},$$

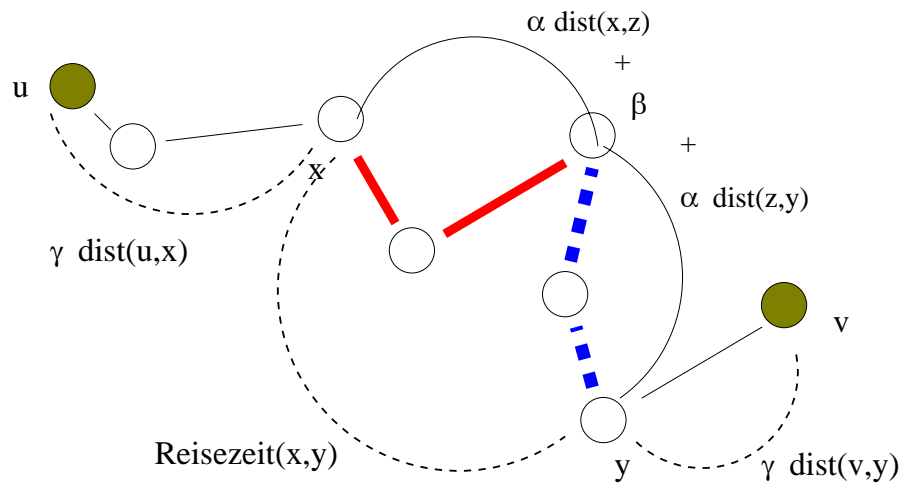
$$\text{Reisezeit}(x, y) = \alpha \text{dist}(x, y) + \beta |\text{transfers}|$$

wobei wir  $\alpha \leq \gamma$  annehmen.

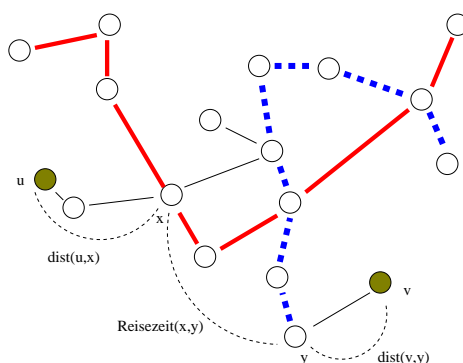
### Hub-Linienplatzierung



## Bestimmung der Reisezeit(x, y)



## Unterschiede zum klassischen Hub-Standort-Problem



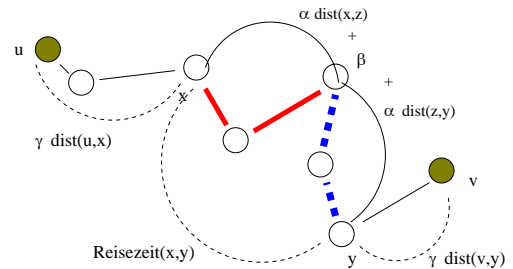
- Das Hubnetzwerk ist nicht vollständig.
- Die Kosten liegen auf den Hub-Kanten, nicht auf den Hub-Knoten.
- Umsteigevorgänge!
- Die Kunden müssen das Hub-Netzwerk nicht benutzen.

**Folge:** Hub-Linien-Problem.

## Spezialfälle

$$D(u, v) = \min_{x, y \in \mathcal{L}} \{ \gamma \text{dist}(u, x) + \underbrace{\alpha \text{dist}(x, y) + \beta \text{transfers}(x, y)}_{\text{Reisezeit}(x, y)} + \gamma \text{dist}(y, v) \},$$

- $\gamma = 0$ : Linienplanung
- $\alpha = \beta = 0$ : Linienplatzierung
- beim Bestimmen der Reisezeit:
  - $\alpha = 0$  : Zähle ausschließlich die Anzahl der Umsteigevorgänge
  - $\beta = 0$  : Zähle die Länge des Weges im Verkehrsnetz



## Klassifikation und Komplexität

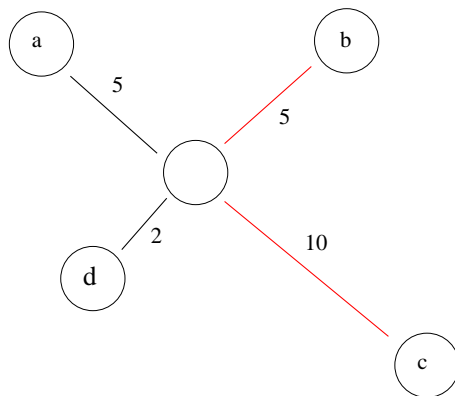
**Fall 1.** Diskrete Menge potentieller Linien ist gegeben.

**Fall 2.** Alle Pfade sind als Linien erlaubt.

**Ergebnis:** In beiden Fällen ist das Problem NP-schwer (Linienplanung ist Spezialfall)

(Beweis für NP-Vollständigkeit des Problems der Linienplanung, siehe Schöbel und Scholl)

## Ein Beispiel mit einer einzigen Linie



Quelle-Ziel-Matrix:

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>a</i>	0	10	1	4
<i>b</i>		0	8	2
<i>c</i>			0	3
<i>d</i>				0

$$w_a = 15$$

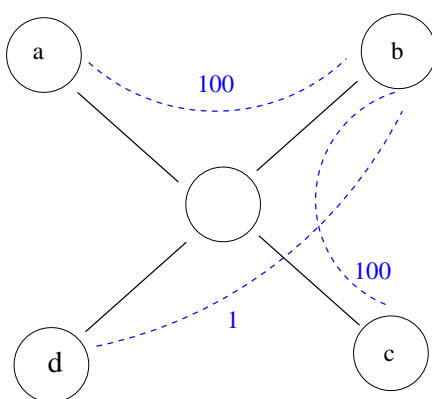
$$w_b = 20$$

$$w_c = 12$$

$$w_d = 9$$

**Folge:**  $b - 0 - c$  ist optimal für die Linienplatzierung **und** für das Hub-Linienplatzierungsproblem.

## Ein Beispiel für zwei Linien mit Umsteigen



Quelle-Ziel-Matrix:

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>a</i>	0	100	0	0
<i>b</i>		0	100	1
<i>c</i>			0	0
<i>d</i>				0

**Folge:**

$a - 0 - b$  und  $d - 0 - c$  ist optimal für das Linienplatzierungsproblem

**aber:**

$a - 0 - b$  und  $b - 0 - c$  ist optimal für das Hub-Linienplatzierungsproblem.

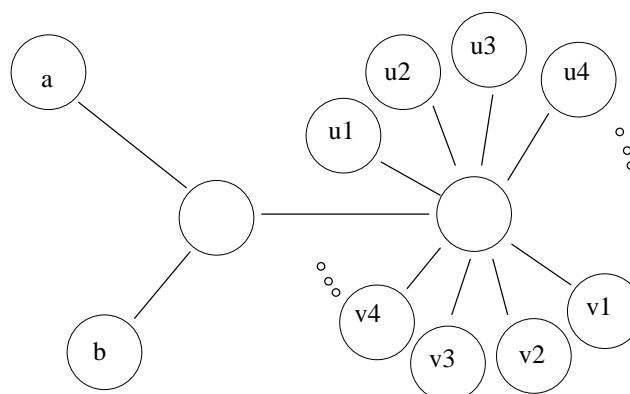
## Linienplatzierung in Sternen

**Ergebnis:** Sei  $G$  ein Stern. Dann stimmen die Optimallösungen des Linienplatzierungsproblem und des Hub-Linienplatzierungsproblem überein, falls

- nur eine Linie platziert werden soll, oder
- falls  $\beta = 0$  (Umsteigen wird nicht gezählt).

## Kann man das Ergebnis auf Bäume verallgemeinern?

In beliebigen Bäumen: nein!

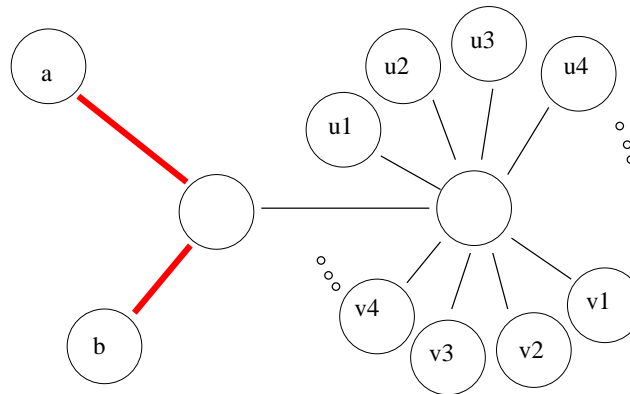


Quelle-Ziel-Daten: von  $a$  nach  $b$ : 8 Kunden  
von  $u_i$  nach  $v_j$ : 1 Kunde

Also:  $w_a = 8$ ,  $w_b = 8$ ,  $w_{u_i} = w_{v_j} = 1$

## Kann man das Ergebnis auf Bäume verallgemeinern?

In beliebigen Bäumen: nein!



mit  $\gamma = 1, \alpha = \frac{1}{2}$ :

Linie

Zielfunktion Linienplatzierung

Zielfunktion Hub-Linienplatzierung

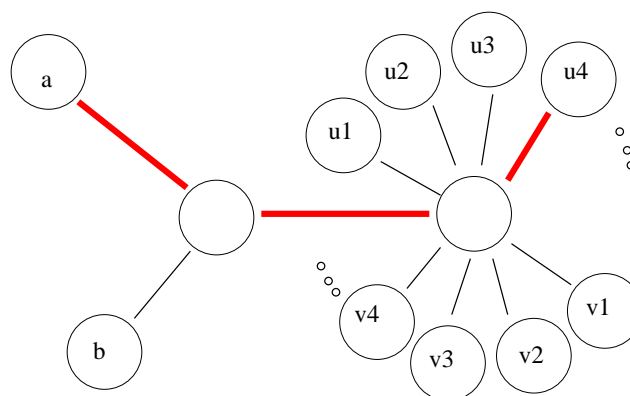
$l_1$

15

27.5

## Kann man das Ergebnis auf Bäume verallgemeinern?

In beliebigen Bäumen: nein!



mit  $\gamma = 1, \alpha = \frac{1}{2}$ :

Linie

Zielfunktion Linienplatzierung

Zielfunktion Hub-Linienplatzierung

$l_2$

17

24

## Kann man das Ergebnis auf Bäume verallgemeinern?

In beliebigen Bäumen: nein!

Aber mit “Bedarfsdaten mit Sternstruktur” gilt:

**Ergebnis:** Sei  $G$  ein Baum. Es gebe **einen Knoten  $\bar{v}$**  der auf allen Wegen  $P_{uv}$  von  $u$  nach  $v$  für alle  $(u, v)$  mit  $w_{uv} > 0$  enthalten ist.

Dann stimmen die Optimallösungen des Linienplatzierungsproblems und des Hub-Linienplatzierungsproblems überein, falls

- nur eine Linie platziert werden soll, oder
- falls  $\beta = 0$ .

## 1. Hub Modell

$\beta = 0$  und alle Pfade sind als Linien erlaubt:

- Wir berechnen die *Reisezeit* ohne Strafe für Umsteigevorgänge.
- Das Problem besteht dann in der Platzierung von **Hub-Kanten**.

**Vergleiche:** Campbell/Lowe/Zhang: Upgrading arcs

## $\beta = 0$ und alle Pfade sind als Linien erlaubt

$$X_{uv}^e = \begin{cases} 1 & \text{falls } e \text{ eine Hub-Kante im Pfad von } u \text{ nach } v \text{ ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$S_{uv}^e = \begin{cases} 1 & \text{falls } e \text{ keine Hub-Kante, aber im Pfad von } u \text{ nach } v \text{ ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\min \sum_{u,v \in V} w_{uv} \left( \sum_{e=(i,j) \in E} \alpha d_e X_{uv}^e + \sum_{e=(i,j) \in E} \gamma d_e S_{uv}^e \right)$$

s.t.

$$\sum_{i:e=(i,k)} X_{uv}^e + S_{uv}^e - \sum_{i:e=(k,i)} X_{uv}^e + S_{uv}^e = \begin{cases} 1 & \text{falls } k = v \\ 0 & \text{falls } k \notin \{u, v\} \\ -1 & \text{falls } k = u \end{cases}$$

$$\sum_{e \in E, u, v \in V} d_e X_{uv}^e \leq B$$

## 2. Hub Modell

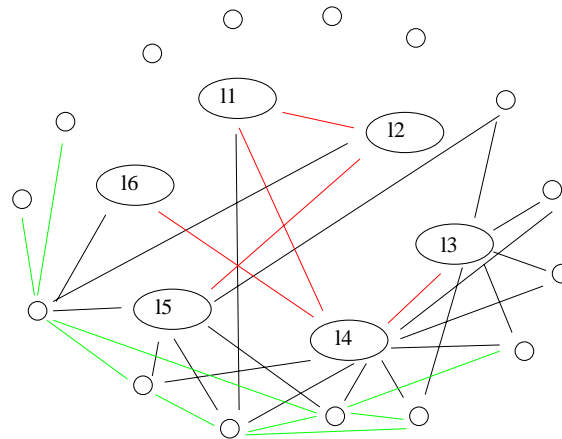
$\alpha = 0$  und eine Menge potentieller Linien ist gegeben:

- Wir berechnen die *Reisezeit* ausschließlich anhand der Umsteigevorgänge.
- Das Problem besteht dann in der Platzierung von **Hub-Knoten** und **Hub-Kanten**.

**Vergleiche:** Nickel/Schöbel/Sonneborn: Location of hub nodes *and* hub edges



## $\alpha = 0$ und Menge potentieller Linien gegeben



Das ist ein Hub Problem, aber:

- direkte Verbindungen zwischen nicht-Hubs sind erlaubt
- das Hub-Netzwerk ist nicht vollständig

Ein Modell wie in Nickel/Schöbel/Sonneborn kann verwendet werden!

## Allgemeiner Fall

Menge der potentiellen Linien ist gegeben:

- Erweitere das change & go Graph Modell von Schöbel/Scholl
- Verwende Dantzig Wolfe Dekomposition

Alle Pfade sind als Linien erlaubt:

- Erweitere Modell von Laporte/Marin/Mesa/Ortega um Umsteigevorgänge bewerten zu können
- Lineares ganzzahliges Programm scheint möglich!

## Zusammenfassung und Ausblick

### Was Sie vielleicht eben gesehen haben:

Ein neues Modell, das Linienplatzierung und Linienplanung im öffentlichen Verkehr kombiniert. **Ergebnis: Hub-Linien-Problem!**

### Was Sie vielleicht in der Zukunft sehen werden:

- Linearzeit-Algorithmen für nur eine Linie in Bäumen
- andere effizient lösbare Spezialfälle
- Dantzig Wolfe Dekomposition für das Hub-Linienproblem mit gegebener Menge an potentiellen Linien
- **Verbesserte Buslinien in Göttingen ...**

# **Modellierung und Optimierung von Hub-and-Spoke-Netzen mit beschränkter Sortierkapazität**

**Dr. Steffen Blunck  
Dr. Andreas Cardeneo**

**Universität Karlsruhe**



## Modellierung und Optimierung von Hub-and-Spoke-Netzen mit beschränkter Sortierkapazität

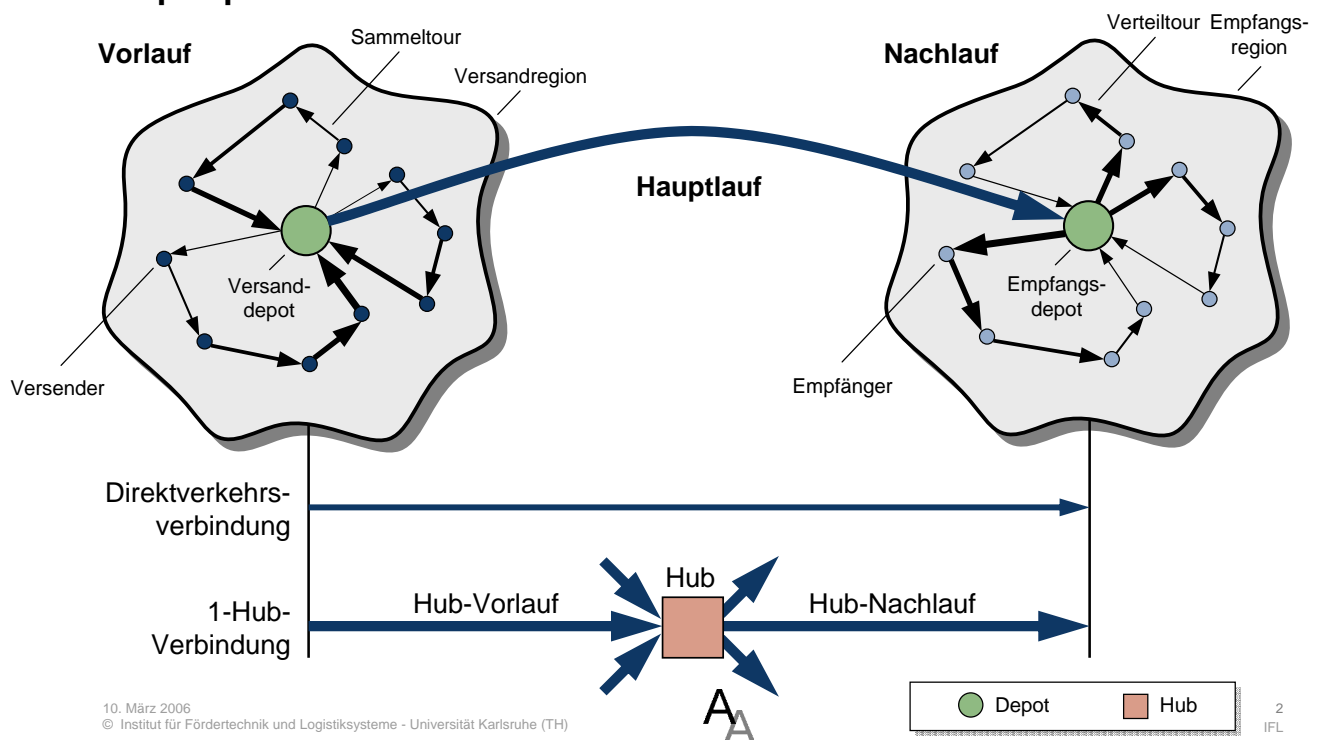
GOR AG Logistik, Bonn, 9.+10. März 2006  
Steffen Blunck, Andreas Cardeneo



Institut für Fördertechnik  
und Logistiksysteme  
Universität Karlsruhe (TH)

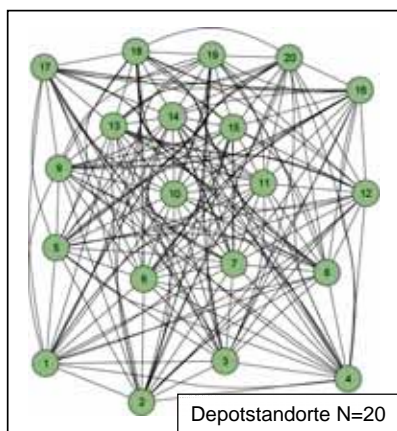


### Transportphasen



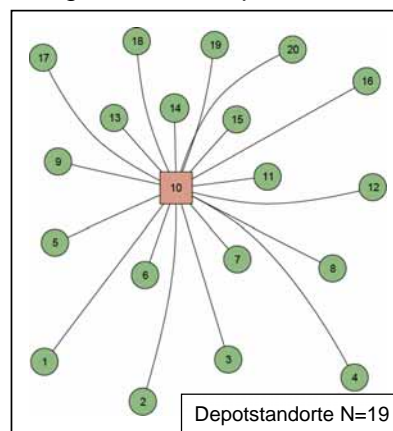
## Grundlegende Transportnetze

Direktverkehrsnetz



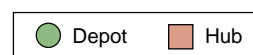
- Hohe Anzahl von Transportrelationen
- Dezentrale Sortierung in jedem Depot

Single-Hub-and-Spoke-Netz



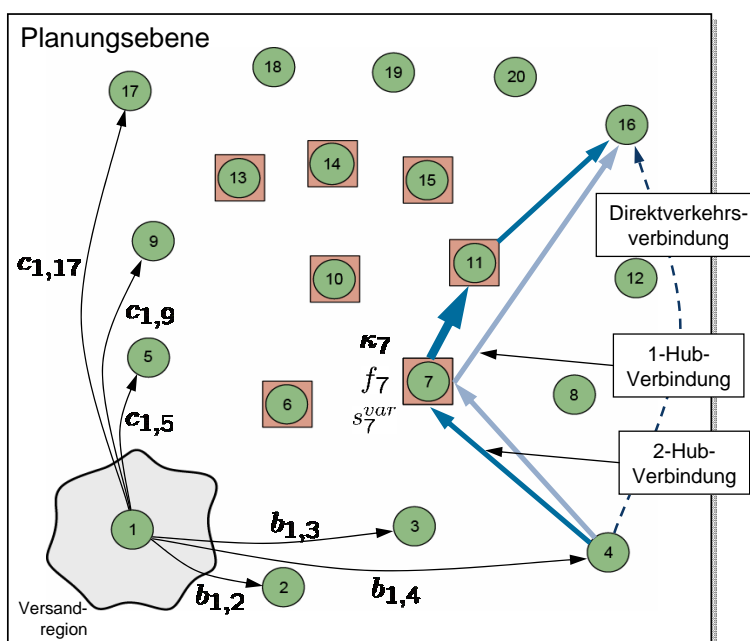
- Zentrale Sortierung im Hub
- Reagiert sensibel auf Verspätungen

10. März 2006  
© Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme - Universität Karlsruhe (TH)



3  
IFL

## Formulierung des Hub-Location-Problems



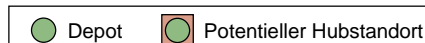
### Eingangsgrößen

- Lage Depotstandorte
- Sendungsaufkommen  $b_{i,j}$
- Transportkosten  $c_{i,j}$
- Lage potentielle Hubstandorte
  - Sortierkapazität  $\kappa_k$
  - Fixkosten  $f_k$
  - Variable Sortierkosten  $s_k^{var}$

### Optimierungskriterium

- Minimiere Summe aus
- Transportkosten
  - Fixkosten
  - Variablen Sortierkosten

10. März 2006  
© Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme - Universität Karlsruhe (TH)



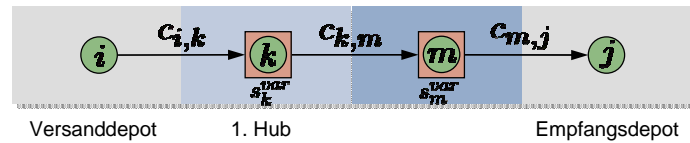
4  
IFL



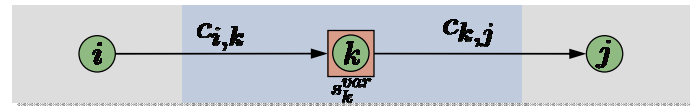
## Optimierungsmodell – Zielfunktion

$$\text{Min } K((x, y)') = \sum_{i \in S_D} \sum_{k \in S_H} \sum_{m \in S_H} \sum_{j \in S_D} c_{ikmj} \cdot b_{ij} \cdot x_{ikmj}$$

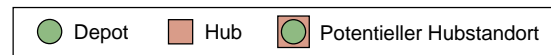
2-Hub-Verbindung



1-Hub-Verbindung



10. März 2006  
© Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme - Universität Karlsruhe (TH)



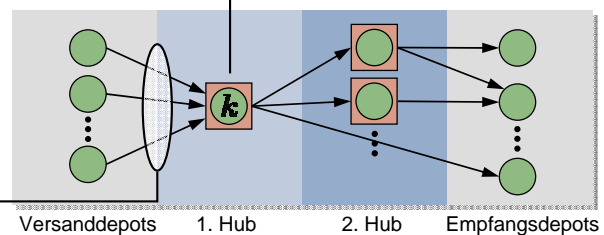
5  
IFL



## Optimierungsmodell – Kapazitätsbeschränkungen

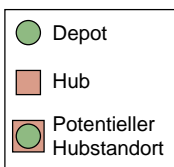
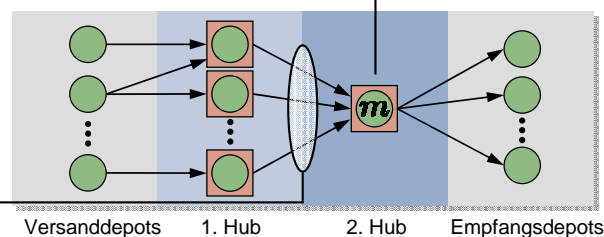
$$\sum_{i \in S_D} \sum_{m \in S_H} \sum_{j \in S_D} b_{ij} \cdot x_{ikmj} \leq y_k \cdot \kappa_k$$

Sortierkapazität  
des potentiellen Hubs  $k$



$$\sum_{i \in S_D} \sum_{\substack{k \in S_H \\ k \neq m}} \sum_{j \in S_D} b_{ij} \cdot x_{ikmj} \leq y_m \cdot \kappa_m$$

Sortierkapazität  
des potentiellen Hubs  $m$

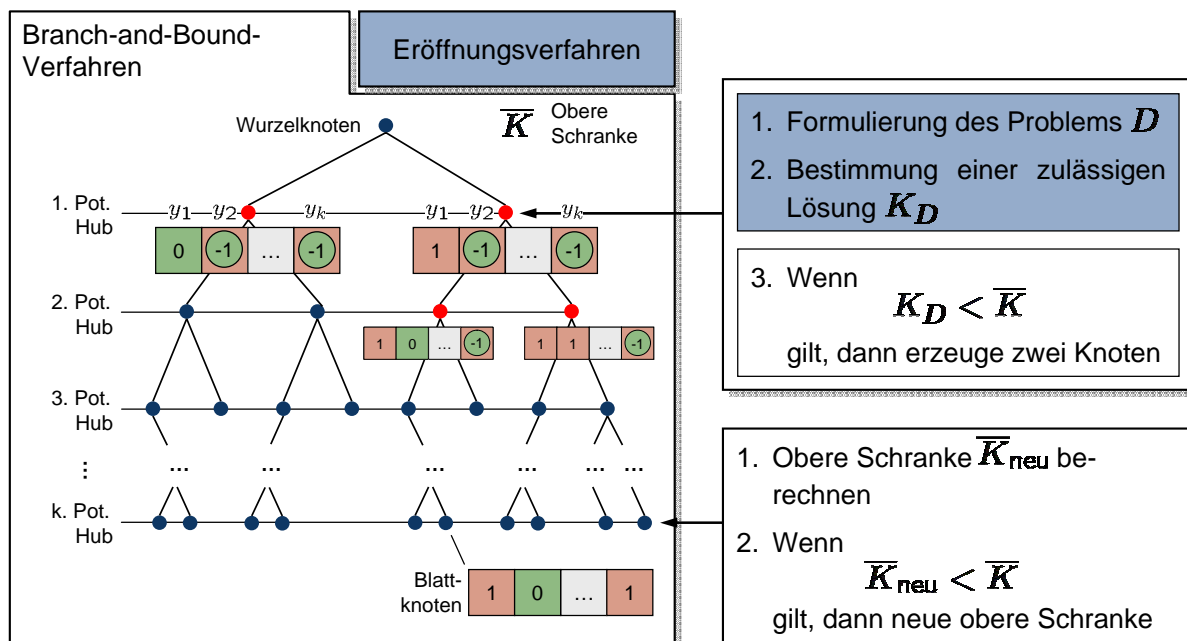


10. März 2006  
© Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme - Universität Karlsruhe (TH)

6  
IFL



## Lösungsansatz

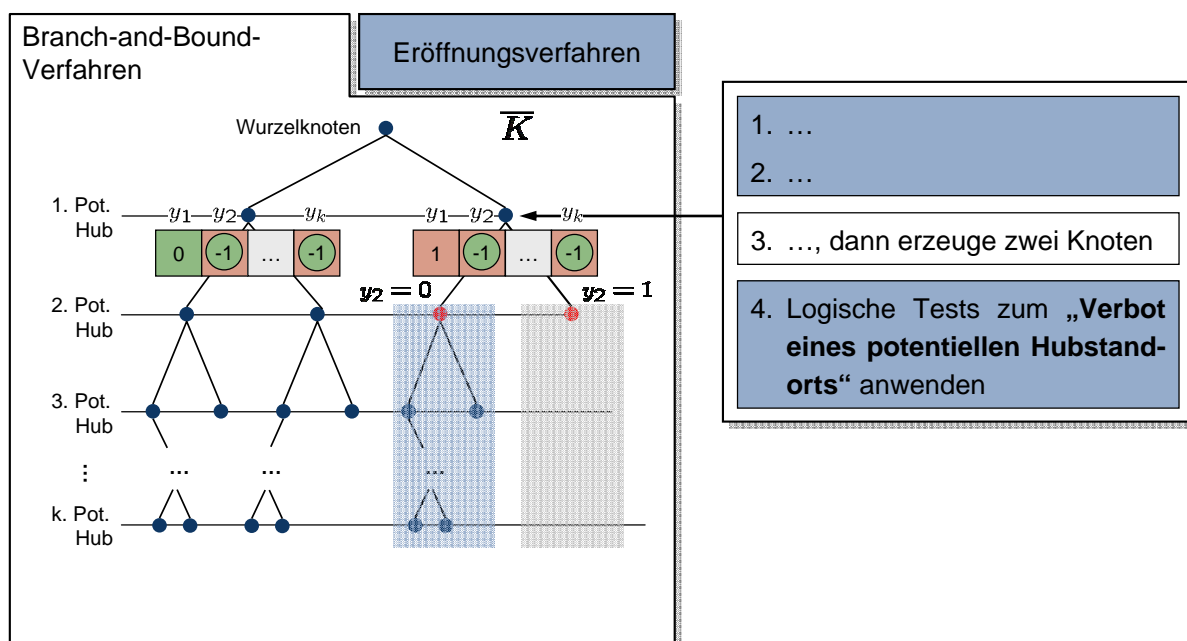


10. März 2006  
© Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme - Universität Karlsruhe (TH)

7  
IFL



## Logische Tests zur Reduzierung der Knotenanzahl



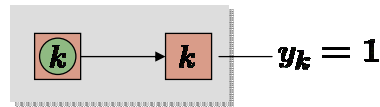
10. März 2006  
© Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme - Universität Karlsruhe (TH)

8  
IFL

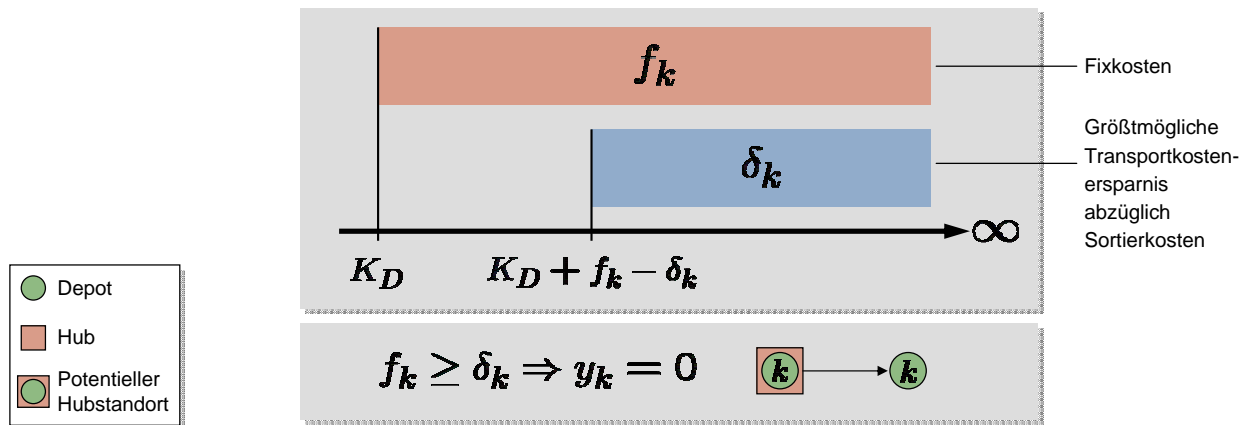


## Logischer Test „Verbot eines potentiellen Hubstandorts“

1. Potentieller Hub  $k$  wird temporär zugelassen



2. Vergleich von Fixkosten sowie Transport- und Sortierkosten

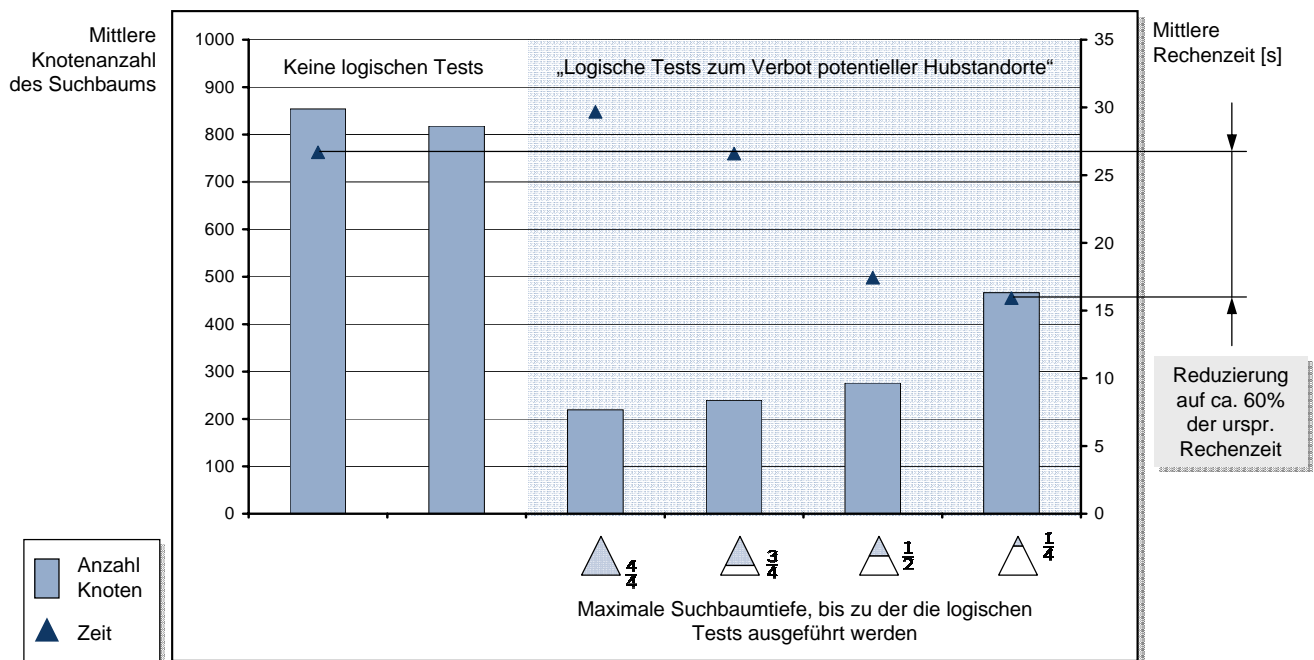


10. März 2006  
© Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme - Universität Karlsruhe (TH)

9  
IFL



## Ergebnisse der Berechnungen



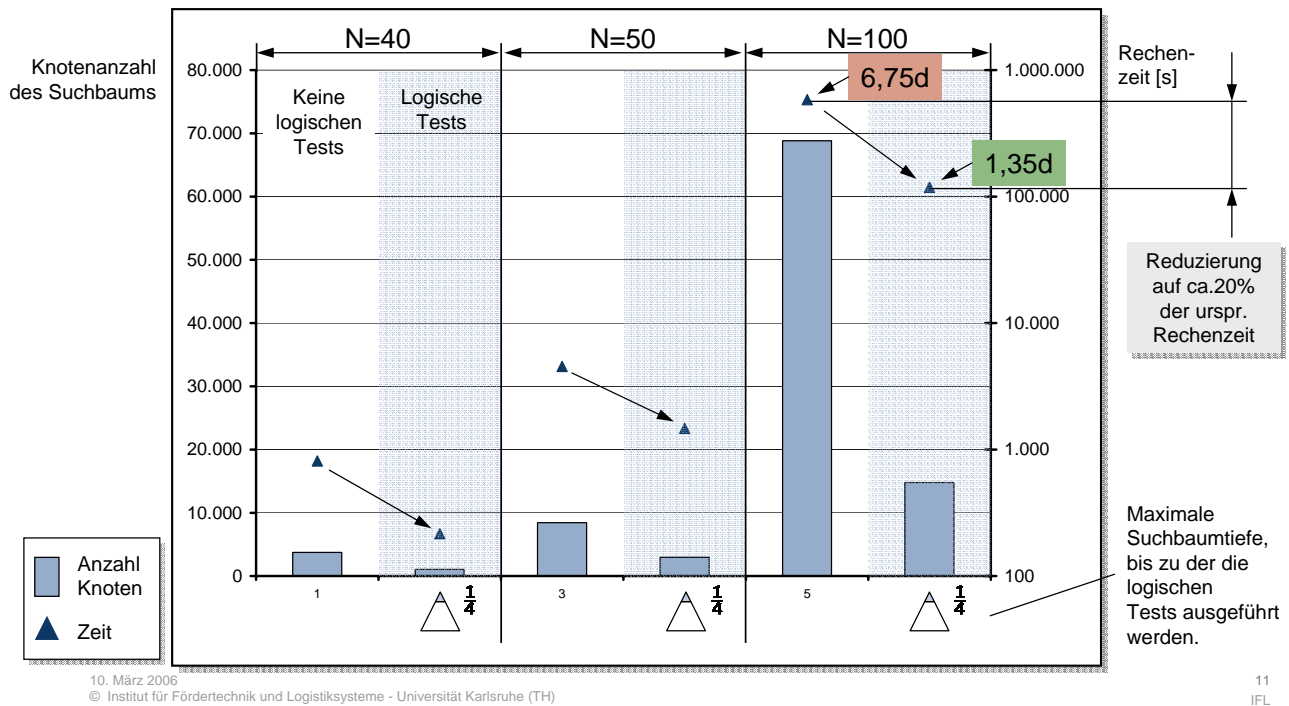
10. März 2006  
© Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme - Universität Karlsruhe (TH)

10  
IFL



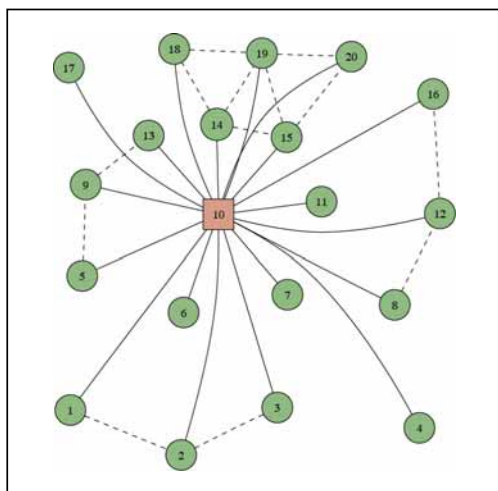


## Ergebnisse großer Planungsprobleme



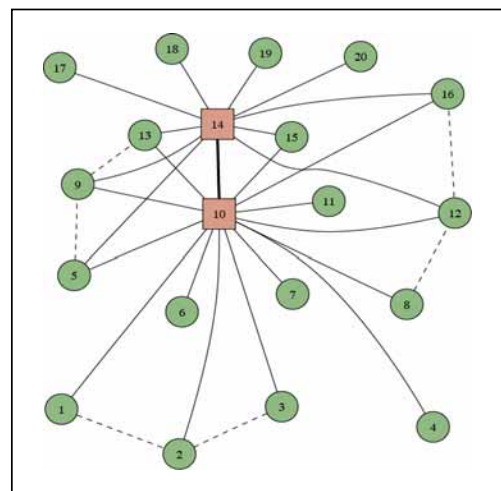
## Berechnete Transportnetze

Unkapazitiertes Hub-Location-Problem



Überschreitung der Sortierkapazität in Hub „10“ um 50%

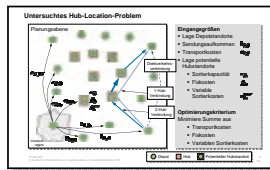
Berücksichtigung der Sortierkapazität



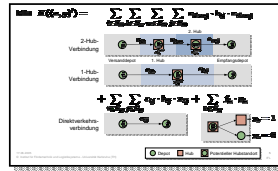
Einhaltung der Sortierkapazitäten in den Hubs „10“ und „14“



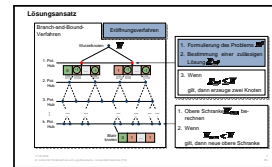
## Zusammenfassung und Ausblick



### Problemformulierung



### Modellbildung



### Lösungs- verfahren



Analyse der Zuverlässigkeit von Hub-and-Spoke-Netzen



Transfer auf Zuliefernetze



Kostenmodellierung für Transporte